

文章编号: 2095-4980(2019)02-0200-05

基于太赫兹 440 GHz 系统目标 RCS 的高精确度测量

赵珊珊, 曾 旻, 杨 琪, 李彦鹏, 秦玉亮, 王宏强

(国防科技大学 电子科学学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 雷达散射截面(RCS)是衡量目标对雷达波散射能力的一个重要物理量, 在目标识别和成像中有重要作用。为解决太赫兹频段目标 RCS 测量精确度不高的问题, 基于 440 GHz 的太赫兹目标 RCS 测量系统, 提出一种新的校准方式并采用软件距离门等技术提高目标 RCS 的测量精确度。随后, 对不同粗糙度的圆柱体进行测量得到其 RCS 测量结果, 与理论值比较分析发现, 采用新的处理技术使测量结果达到了较高的精确水平, 可用于复杂目标 RCS 的测量和缩比规律的研究。

关键词: 太赫兹; 雷达散射截面; 校准; 软件距离门; 误差分析

中图分类号: TN957.51

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201902.0200

High-precision RCS measurement based on 440 GHz terahertz system

ZHAO Shanshan, ZENG Yang, YANG Qi, LI Yanpeng, QIN Yuliang, WANG Hongqiang

(School of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

Abstract: The Radar Cross Section(RCS) is an important physical quantity for measuring the target's ability to scatter radar waves. It plays an important role in target recognition and imaging. A new calibration method is proposed and software distance gate technology is utilized to improve the measurement accuracy of the target RCS based on the 440 GHz terahertz target RCS measurement system. The cylinders with different roughness are measured to obtain the RCS measurement results. Compared with the theoretical values, it is found that using the new processing technology can achieve a high level of accuracy, which can be applied to measure RCS of complex targets and study the law of scaling.

Keywords: terahertz; Radar Cross Section; calibration; software gate; error analysis

近年来,随着太赫兹波的产生、探测、传输等技术的发展,相应的太赫兹理论与技术也日趋成熟,太赫兹频段已越来越成为电磁领域的研究热点^[1]。太赫兹(Terahertz, THz)被定义为 0.1~10 THz(波长 3 mm~30 μm)的电磁波频段^[2],波长介于微波与光波之间,具有十分宽的频谱且具有很广阔的研究前景。因此,围绕太赫兹特性,展开各项基础研究工作具有十分重要的意义。雷达散射截面(RCS)是度量雷达目标对照射电磁波散射能力的一个物理量,对研究太赫兹电磁散射特性具有十分重要的意义^[3]。在太赫兹目标 RCS 测量的研究中,芬兰赫尔辛基科技大学 2006 年基于微波倍频源建立了 0.31 THz 全息太赫兹紧缩场系统,对金属球和平板这样的标准体进行了测试^[4]。2010 年 10 月,美国马萨诸塞大学的亚毫米波技术实验室(Submillimeter-Wave Technology Laboratory, STL)研制出了 240 GHz 的基于微波倍频源的紧缩场 RCS 测量系统,该系统是由 X 波段的电磁波经过 24 倍频获得太赫兹波,并对 1:16 的坦克模型进行了 RCS 测量以及逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)成像^[5]。国内,首都师范大学^[6-7]、东南大学^[8]、国防科技大学^[9-10]、航天科技 802 所^[11]等多家单位也开展了太赫兹雷达系统研究与成像实验。本文介绍了太赫兹测量系统和 RCS 测量原理,在此基础上搭建了 440 GHz 太赫兹目标 RCS 测量平台。采用圆柱体定标代替传统的定标方法,利用该系统对一些目标进行测量,采用新的定标方法和软件距离门等技术提高目标 RCS 的测量精确度,并利用已有的误差估计指标对测试数据进行误差分析。

1 太赫兹 RCS 测量技术

1.1 太赫兹 RCS 测量原理

通常得到目标的雷达散射截面有 2 种方法:第 1 种是对目标的雷达散射截面进行预估,也就是通过解析和理

论计算求得目标的雷达散射截面;第2种是通过实验对目标进行雷达散射截面的测量,研究目标在某种电磁波环境条件下目标雷达散射截面。早在雷达出现之前,球体、无限长圆柱、法向入射抛物柱面等典型形状的纯导体目标的电磁散射的精确解析解^[12]就已经通过计算获得。

RCS 是衡量目标对雷达波散射能力的一个重要物理量,它是目标一个假想面积,是定量表征目标对雷达波散射强弱的物理量,用符号 σ 表示。目标 RCS 的最基本的理论定义式为^[13-14]:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} \quad (1)$$

式中: E_s 为接收天线处的目标散射场强; E_i 为目标处的入射场强; R 为目标与天线的距离, R 趋于无穷大表示雷达同目标之间距离满足远场条件。

1.2 误差估计指标

在对目标进行 RCS 测量时,产生误差的因素有很多,这些误差因素可以被消除或改善,但不可避免地会对最后的实验结果造成影响。总体平均明氏误差反映的是计算结果和测量结果的总体差异:

$$MME = \left[\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{n=1}^N |RCS_M(f_i, \theta_n) - RCS_C(f_i, \theta_n)|^\alpha \right]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (2)$$

式中: $RCS_M(f_i, \theta_n)$ 和 $RCS_C(f_i, \theta_n)$ 分别为 RCS 测量值和计算值,都为频率 f_i 和角度 θ_n 的函数。当 α 取 1 和 2 时,分别对应平均误差和均方根误差。平均误差和均方根误差反映了计算和测量 RCS 数量上的整体接近程度,是平均意义下的误差。具有计算简单、物理意义明确的优点,能够反映被比较两者的总体差异。因此,常被作为度量误差的指标。

2 440 GHz 目标 RCS 实验测量系统

2.1 实验系统与测试条件

本实验采用基于矢量网络分析仪的微波倍频源太赫兹目标特性测量系统。由矢量网络分析仪产生的电磁波源基础频率为 13.45~14.25 GHz,经过 32 倍频后,其工作中心频率达到 0.44 THz,带宽为 25.6 GHz,天线发射功率为 6.7 mW。该系统的静区宽度约为 40 cm,所以任何被测目标的长度不能超过静区范围。配合全方位的 RCS 测量实验,使用精密转台,该转台可与采集系统联动控制,使其可以 0.1° 间隔稳定地步进旋转,进行数据的采集。实验系统组成见图 1。

实验的暗室环境全面地覆盖了适用于太赫兹波段电磁波的吸波材料,它不仅对背景噪声与杂波的抑制效果良好,而且能够通过降低墙壁以及地面对电磁波的反射从而降低多径效应对测量结果造成的影响。实验场景见图 2。

2.2 RCS 测量系统校准

系统校准决定了 RCS 测量的准确性。校准 RCS 测量系统的传统方法是使用光滑金属球体进行校准,它各向同性,理论 RCS 值稳定且易于计算,并且与波长无关,唯一要求是它的大小应大于波长^[15]。

光滑金属球的理论 RCS 值为:

$$\sigma = \pi a^2 \quad (3)$$

式中 a 为金属导体球的半径。当金属球的半径为 10 cm 时,其 RCS 理论值为 -15.02 dBsm。

而光滑金属圆柱体 RCS 理论值随角度变化非常敏感,只有当它的底部或侧面越过天线时才会发生镜面反射,

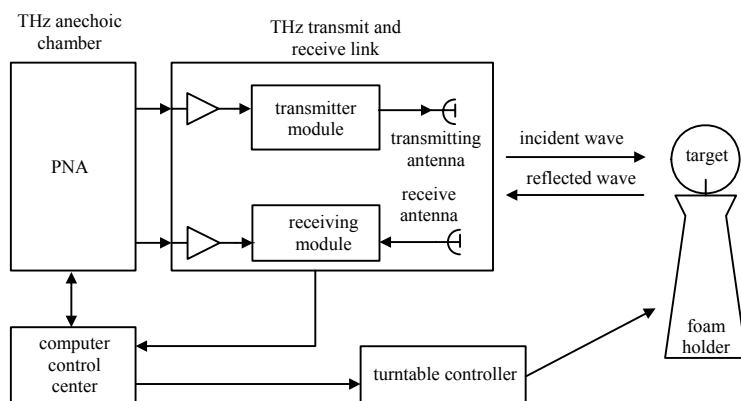


Fig.1 Schematic diagram of the experimental system
图 1 实验系统组成示意图



Fig.2 Experimental measurement environment
图 2 实验测量环境

才能产生较强的回波。当侧面正对天线时, 其 RCS 理论值为:

$$\sigma = \frac{2\pi ab^2}{\lambda} \quad (4)$$

当圆柱体底面正对天线时, 它的理论值为:

$$\sigma = \frac{4\pi^3 a^4}{\lambda^2} \quad (5)$$

式中: a 为圆柱体的底面半径; b 为圆柱体的高度; λ 为信号波长。本实验室使用的圆柱体高度为 20 cm, 底面半径为 4 cm。当信号频率为 440 GHz 时, 计算得到该圆柱体侧面和底面 RCS 分别为 11.68 dBsm 和 28.34 dBsm。很显然, 圆柱体特定角度的 RCS 比球体目标大得多。因此, 尝试利用光滑金属圆柱体定标来提高系统 RCS 测量的精确度。

当用圆柱体定标时, 同时使用底面和侧面的计算和测量值计算校准系数, 校准后 RCS 测量值的计算公式为:

$$\sigma = \sigma_0 \left(\frac{tc_1 - tc_2}{ms_1 - ms_2} \right) + s \quad (6)$$

式中: tc_1 和 ms_1 分别为圆柱体底面 RCS 的理论值和测量值; tc_2 和 ms_2 分别为圆柱体侧面 RCS 的理论值和测量值; σ_0 为原始 RCS 测量值; s 为偏差校准值。在本次实验中, 取 s 值为:

$$s = tc_1 - ms_1 \left(\frac{tc_1 - tc_2}{ms_1 - ms_2} \right) \quad (7)$$

因此在本次实验中, 利用式(6)进行校准来提高 RCS 的测量精确度。

3 RCS 测量结果

3.1 实验目标

本实验利用粗糙度为 $0.03 \mu\text{m}$ 的金属圆柱体定标, 它近似为光滑圆柱体, 对粗糙度分别为 $0.3 \mu\text{m}$, $3 \mu\text{m}$, $30 \mu\text{m}$, $300 \mu\text{m}$ 的金属圆柱体进行 RCS 测量。定标圆柱体和实验测量的圆柱体见图 3。

3.2 实验结果

测量定标圆柱体的 RCS, 它进行自定标, 测量结果见图 4, 横坐标代表水平角度, 从 0° 测量至 360° , 纵坐标代表目标的 RCS 值, 单位是 dBsm。图中有 4 个明显的峰值, 分别为圆柱体的 2 个底面和 2 个侧面的反射值。其中, 圆柱体 2 个底面反射最强, 其 RCS 值最大, 其次为 2 个侧面的 RCS 值较大。其他角度非镜面反射, 回波强度较小, 被淹没在噪声中。因此在对圆柱体 RCS 的测量中, 着重关注圆柱体这 4 个峰值。

随后分别测量其他 4 个不同粗糙度的圆柱体, 对所获得的回波数据采用软件距离门等技术手段抑制噪声, 再利用定标圆柱体对它们进行定标校准, RCS 测量结果见图 5, 可以清楚地看到它们都有 4 个较为明显的 RCS 峰值, 分别位于 35° , 125° , 215° 和 305° , 这和圆柱体本身的对称性有关。其中, 35° 和 215° 角度的 RCS 值对应圆柱体 2 个底面的散射, 为圆柱体最大的 RCS 值; 125° 和 305° 角度处的 RCS 值为圆柱体 2 个侧面散射较大的 2 个角度, 它们的散射仅次于底面的散射。通过计算金属圆柱体的底面和侧面 RCS 的理论值, 可以得到 $f=440 \text{ GHz}$ 时, $\sigma_{\text{底}}=28.34 \text{ dBsm}$, $\sigma_{\text{侧}}=11.68 \text{ dBsm}$ 。将图 5 中的 RCS 4 个峰值与计算所得的理论值相比较可以发现, 测量值与理论值吻合度较高。

对比不同粗糙度圆柱 RCS 的测量结果, 可以看出在太赫兹频段不同粗糙度对目标 RCS 是有影响的。在本文

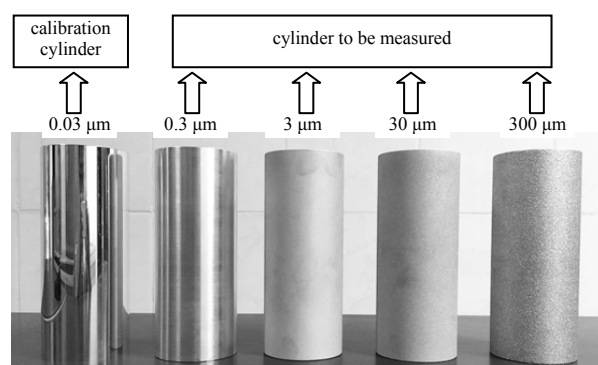


Fig.3 Metal cylinders with different roughness used in the experiment
图 3 实验中使用的不同粗糙度金属圆柱体

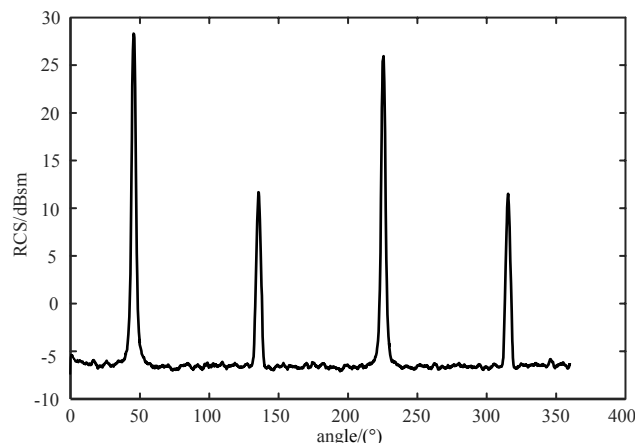


Fig.4 RCS of a 440 GHz calibration cylinder
图 4 440 GHz 定标圆柱体的 RCS

讨论的粗糙度范围内, 镜面反射对应的 4 个角度 35° , 125° , 215° 和 305° , 粗糙度对 RCS 基本没有影响, 但是在其他漫反射角度, 粗糙度对目标 RCS 的影响逐渐显露出来, 且表面越粗糙, 目标 RCS 的测量值越大。这可能是因为太赫兹波长极短, 与粗糙面的细微结构数量级相当, 所以漫反射对 RCS 的影响较为明显。因此, 在太赫兹频段粗糙度对目标 RCS 的影响将在后续工作中继续研究。

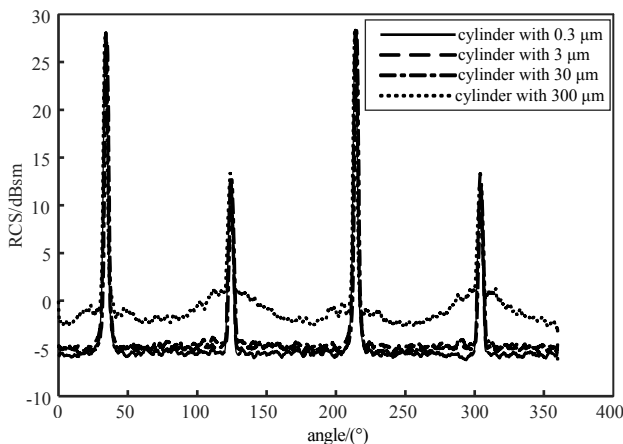


Fig.5 RCS of 440 GHz metal cylinders with roughness of 0.3 μm , 3 μm , 30 μm , 300 μm

图 5 440 GHz 粗糙度分别为 0.3 μm , 3 μm , 30 μm , 300 μm 的金属圆柱 RCS

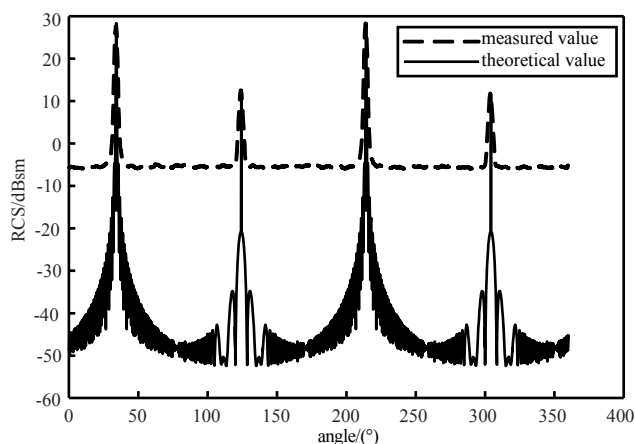


Fig.6 Comparison of measured and standard values for metal cylinder with a roughness of 0.3 μm

图 6 粗糙度为 0.3 μm 的金属圆柱体测量值和标准值对比

4 误差估计

将实验结果与用电磁计算软件 CST 计算得出的理论结果作比较, 以粗糙度为 0.3 μm 的圆柱体测量结果为例, 可以得到图 6 的对比结果。其中, 虚线为实验 RCS 测量值, 实线为 CST 计算的 RCS 理论值。在图 6 中, 可以明显地看到, 圆柱体 RCS 测量值的 2 个明显峰值与理论值拟合较好, 而在其他角度, 由于回波信号弱, 被淹没于噪声中, 并不能被准确测量到。因此, 受限实际的实验系统, 只能着重关注那 4 个较为明显的峰。随后, 计算 4 个峰值点的误差, 可以得到: a) 圆柱体 2 个底面峰值点误差值分别为: 0.81 dBsm 和 0.68 dBsm; b) 圆柱体 2 个侧面峰值点误差值分别为: 0.51 dBsm 和 0.34 dBsm。

综上, 由图 5 和图 6 可得, 圆柱体 RCS 测量值在 4 个峰值区间与其理论值拟合较好, 4 个峰值点的误差值较小, 说明采用这种新的定标方式能够提高该系统的 RCS 测量精确度。

5 结论

本文基于矢量网络分析仪微波倍频源系统, 在中心频率为 440 GHz 时, 对不同粗糙度的圆柱体目标进行了 RCS 测量。得到回波数据后, 利用软件距离门等技术抑制噪声, 采用圆柱体定标这种新的定标方式进行校准, 提高目标 RCS 的测量精确度。实验结果表明, 目标的测量值与其理论值吻合程度较高, 说明本系统的测量精确度较高, 数据校准和处理方法具有一定的有效性。在今后的研究中, 可以在此处理方法上进行改善, 提高目标 RCS 的测量精确度。此外, 在之后的实验测量中可以研究目标粗糙程度对其 RCS 的影响。

参考文献:

- [1] 刘盛纲, 钟任斌. 太赫兹科学技术及其应用的新发展[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(5): 481-486. (LIU Shenggang, ZHONG Renbin. New development of terahertz science and technology and its application[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38(5): 481-486.)
- [2] LIU H B, ZHONG H, KARPOWICZ N, et al. Terahertz spectroscopy and imaging for defense and security applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(8): 1514-1527.
- [3] 聂在平, 方大纲. 目标与环境电磁散射特性建模——理论、方法与实现(基础篇)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009. (NIE Zaiping, FANG Dagang. Modeling of electromagnetic scattering characteristics of targets and environments—theory, method and implementation(Basic)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.)
- [4] LONNQVIST A, MALLAT J, RAISANEN A V. Phase-hologram-based compact RCS test range at 310 GHz for scale models[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(6): 2391-2397.

- [5] DEMARTINIS G B,MICHAEL J C,THOMAS M H. A 240 GHz polarimetric compact range for scale model RCS measurements[C]// Proceedings of Antenna Measurements Techniques Association(AMTA). Atlanta,GA:[s.n.], 2010:3-8.
- [6] 梁美彦,张存林. 相位补偿算法对提高太赫兹雷达距离像分辨率的研究[J]. 物理学报, 2014,63(14):148701-1-148701-6. (LIANG Meiyang,ZHANG Cunlin. Research on improving the range image resolution of terahertz radar by phase compensation algorithm[J]. Journal of Physics, 2014,63(14):148701-1-148701-6.)
- [7] LIANG M Y,ZHANG C L,ZHAO R,et al. Experimental 0.22 THz stepped frequency radar system for ISAR imaging[J]. Journal of Infrared,Millimeter,and Terahertz Waves, 2014,35(9):780-789.
- [8] CHEN G,PEI J,YANG F,et al. Terahertz-wave imaging system based on backward wave oscillator[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2012,2(5):504-512.
- [9] 杨琪,邓彬,王宏强,等. 基于 Simulink 的太赫兹雷达系统仿真[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(2):174-178. (YANG Qi,DENG Bin,WANG Hongqiang,et al. Simulation of terahertz radar system based on Simulink[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(2):174-178.)
- [10] 蒋彦雯,邓彬,王宏强,等. 基于时域光谱系统的太赫兹圆柱 RCS 测量[J]. 红外与激光工程, 2014,43(7):2223-2227. (JIANG Yanwen,DENG Bin,WANG Hongqiang,et al. Measurement of terahertz cylindrical RCS based on time domain spectroscopy system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014,43(7):2223-2227.)
- [11] 黄欣,武亚君,王晓冰,等. 太赫兹目标雷达散射截面测量技术[J]. 空间电子技术, 2013,10(4):104-108. (HUANG Xin, WU Yajun,WANG Xiaobing,et al. Radar cross section measurement technique for terahertz target[J]. Space Electronics, 2013,10(4):104-108.)
- [12] 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. (HUANG Peikang,Yin Hongcheng,XU Xiaojian. Radar target characteristics[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2005.)
- [13] 何国瑜,卢成才,洪家才,等. 电磁散射的测量与计算[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2006. (HE Guoyu,LU Chengcai, HONG Jiakai,et al. Measurement and calculation of electromagnetic scattering[M]. Beijing:Beihang University Press, 2006.)
- [14] KNOTT E F,SHAEFFER J F,TULEY M T. Radar cross section[M]. 2nd ed. Raleigh,NC:Scitech Publishing Inc., 2004.
- [15] 李柱贞,吕婴,向家武. 雷达散射截面常用计算方法[M]. 北京:目标特性研究编辑部, 1981. (LI Zhuzhen,LYU Ying, XIANG Jiawu. Common calculation methods for radar cross sections[M]. Beijing:Editorial Office of Target Characteristics Research, 1981.)

作者简介:



赵珊珊(1994-),女,山西省临汾市人,在读硕士研究生,主要研究方向为太赫兹雷达、雷达散射截面测量.email:shanshanzhao17@163.com.

李彦鹏(1972-),男,河北省衡水市人,博士,副研究员,主要研究方向为目标识别效果评估、自适应信号处理.

曾 旻(1989-),男,长沙市人,讲师,主要研究方向为太赫兹雷达系统、太赫兹时域频谱技术研究.

杨 琪(1989-),男,陕西省渭南市人,讲师,主要研究方向为太赫兹雷达系统、太赫兹雷达微动与成像研究.

秦玉亮(1980-),男,山东省潍坊市人,博士,主要研究方向为太赫兹雷达、雷达关联成像和电磁涡旋.

王宏强(1970-),男,陕西省凤翔县人,博士,研究员,主要研究方向为太赫兹雷达、雷达信号处理和自动目标识别.