

文章编号: 2095-4980(2018)06-0950-05

太赫兹雷达 RCS 测量中的分时定标技术

宋 炎, 李彦鹏, 李东起, 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: 太赫兹频段的目标散射特性测量技术是当前太赫兹雷达的重要研究方向, 其中系统定标技术决定了雷达散射截面(RCS)测量结果的准确性。使用基于微波倍频源的太赫兹宽带雷达目标散射特性测量系统, 该系统由微波源经倍频后, 中心频率达到 440 GHz, 带宽达 25.6 GHz。利用光滑表面金属球为标准体, 采用分时定标技术对太赫兹雷达系统进行定标, 再对金属材质的战斗机模型和吉普车模型进行近场 RCS 测量实验, 获得以上 2 种典型人造目标的近场 RCS 测量结果。测试结果与理论趋势符合良好, 证明了太赫兹雷达系统 RCS 测量中分时定标技术的有效性。

关键词: 太赫兹; 雷达散射截面; 分时定标; 微波倍频系统

中图分类号: TN95

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201806.0950

Different times calibration in RCS measurement of terahertz radar

SONG Yan, LI Yanpeng, LI Dongqi, QIN Yuliang, WANG Hongqiang

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

Abstract: Radar Cross Section(RCS) measurement under the terahertz band is one of the important research directions of terahertz radar. The system calibration technology determines the accuracy of the RCS measurement results. In this paper, RCS measurement system of terahertz wideband radar based on microwave frequency doubling source, the system has a central frequency at 440 GHz and its bandwidth is 25.6 GHz after the frequency doubled. Using a smooth surface metal sphere as the standard body, calibration of terahertz radar system by different times calibration technique, then the near field RCS measurement experiment of the fighter model and the jeep model of metal material are also carried out. Near field RCS measurements of two typical artificial targets have been obtained. The results are in good agreement with the theoretical trends, which proves the effectiveness of the time-sharing calibration technique in RCS measurement in terahertz radar systems.

Keywords: terahertz; Radar Cross Section; different times calibration; microwave frequency doubling system

太赫兹(Terahertz, THz)频率范围为 0.1~10 THz, 其波长范围为 30 μm ~3 mm, 在电磁波谱上位于红外和微波之间、电子学与光学间的过渡区。由于其所处的特殊位置, 使其具有很多不同于其他频段电磁波的特性。与微波相比, 太赫兹的波长更短, 具有更强的目标散射特性的分辨能力, 相对较高的频率容易产生大宽带信号, 具有更高的距离分辨力, 可以对更小尺寸的目标进行探测。与激光相比, 太赫兹具有较强的穿透能力, 其对气候环境要求相对较低。其在信息科学技术、光谱成像技术、生物医学工程等领域有着重要的应用, 并且在反恐安检、无损探伤、无线通信等应用上也有独特优势^[1-2]。

雷达散射截面(RCS)是目标在雷达波照射下所产生回波强度的物理量, 其在目标识别、成像中有着重要作用。在太赫兹技术发展过程中, RCS 测量的研究倍受关注, 20 世纪末, 国外的马萨诸塞大学洛厄尔分校的亚毫米波技术实验室对缩比目标模型分别用 0.16 THz, 0.24 THz, 0.524 THz, 0.585 THz 和 1.56 THz 的雷达系统在紧缩场环境下进行了 RCS 测量^[3-7]。国内的航天科技集团、中国工程物理研究院、中科院电子所及许多院校在太赫兹雷达成像、RCS 测量等方面获得了大量研究成果。太赫兹目标 RCS 测量也得到快速发展^[8], 天津大学在太赫兹目标散射特性测量方面做了大量的实验, 使用其搭建的 0.2 THz 返波管振荡器源太赫兹波目标散射特性实验测试

系统,对粗糙金属铜盘、粗糙金属球、粗糙铝板等目标进行了 RCS 测量工作,并给出了使用理想导体、粗糙表面、金属球体作为太赫兹雷达散射截面的定标体具有易于测量、数据稳定且测试方法可靠的特点^[9-11]。

为了能够获得目标准确的 RCS 测量结果,最根本也是必不可少的一步就是对测量系统进行定标。无论在暗室环境内的静态目标 RCS 测量,还是在外场动态目标的 RCS 测量,通常都采用光洁度较高且有解析解的标准体进行系统定标。在没有使用定标体的情况下也会采用相对定标的方式完成对系统的定标^[12]。

本文简要介绍了宽带雷达的 RCS 测量原理与系统定标方法,结合太赫兹雷达系统与暗室环境,对人造典型目标的模型进行高精度 RCS 测量,采用基于频域的背景对消技术对数据进行处理,获得了典型目标模型的 RCS 测量结果。

1 宽带雷达 RCS 测量原理

目标的雷达散射截面的获得方法有 2 种:一种是对目标的雷达散射截面进行预估,即通过解析和理论计算,求得目标的雷达散射截面值;一种就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的目标雷达散射截面。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就已经通过计算获得。

RCS 定义为单位立体角内目标朝接收方向散射的功率与从给定方向入射于该目标的平面波功率密度之比的 4π 倍。分别用 \mathbf{E}_i 和 \mathbf{E}_s 表示入射电场强度和散射电场强度,则目标的 RCS 表达式为:

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{|\mathbf{E}_s|^2}{|\mathbf{E}_i|^2} \quad (1)$$

当雷达与目标的距离 R 足够远时,照射目标的入射波则可近似为平面波,此时 σ 与 R 无关,根据电场与磁场的储能可相互转换的原理,远场条件下的 RCS 表达式为:

$$\sigma = 4\pi \lim_{x \rightarrow \infty} R^2 \frac{|\mathbf{E}_s|^2}{|\mathbf{E}_i|^2} = 4\pi \lim_{x \rightarrow \infty} R^2 \frac{|\mathbf{H}_s|^2}{|\mathbf{H}_i|^2} \quad (2)$$

式中 \mathbf{H}_i 和 \mathbf{H}_s 分别表示入射磁场强度和散射磁场强度。

RCS 是受很多因素影响的复杂函数,它和目标结构、形状、尺寸、材料、粗糙度以及目标相对于入射和散射方向的姿态有关,还和入射波的频率、波形以及接收天线的极化形式有关。

在带宽较大的情况下,目标照射波的频谱很宽,目标对各频率分量的响应不同,散射回波的谱分布与发射谱分布区别较大,通过时域目标的冲激响应 $h(t)$ 来定义宽带雷达测量的 RCS。用归一化冲激响应 $h_1(t)$ 表示为:

$$h_1\left(t - \frac{r}{c}\right) = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{2r}{c} h(r, t) \quad (3)$$

式中: r 为目标与雷达之间的距离; c 为光速。

冲激响应函数 $h(t)$ 与频域传递函数 $H(j\omega)$ 构成傅里叶变换对:

$$\begin{cases} H(j\omega) = F\{h(t)\} = \int_0^{\infty} h(t) e^{-j\omega t} dt \\ h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} H(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \end{cases} \quad (4)$$

用归一化频域传递函数 $H_1(j\omega)$ 表示为:

$$H_1(j\omega) e^{-j\omega r/c} = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{2r}{c} H(j\omega) \quad (5)$$

最终可用功率谱响应特征表示 RCS, 为:

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|E_s(\omega)|^2}{|E_i(\omega)|^2} = \pi c^2 |H_1(j\omega)|^2 \quad (6)$$

则在宽带雷达测量下的目标 RCS 与目标散射的频域传递函数的平方成正比关系^[13]。

2 RCS 测量中的分时定标技术

RCS 实验测量最基本的一步就是使用有解析解的标准体对测量系统进行定标。常用的定标体有金属导体球、金属平板、圆柱等，其中金属导体球最为常用，不论在瑞利区、谐振区还是光学区，金属导体球的 RCS 都更容易计算。

本文采用的微波倍频源太赫兹雷达系统，在雷达信号体制以及信号处理方式上均与微波雷达系统的 RCS 测量方法更为相近，所以实验采用金属导体球作为定标体。太赫兹的波长较短，定标中使用的 2 个金属导体球直径为 20 cm，对于雷达的波长范围均处于光学区。金属导体球的无量纲 RCS 进行归一化并表示为 N_{RCS} ，称为后向散射有效因子，在球对于雷达波长处于光学区时可表示为：

$$N_{RCS} = \frac{\sigma}{\pi a^2} \quad (7)$$

式中 a 为金属导体球的半径。 N_{RCS} 即金属球测量值与理论值的比值。

在 RCS 后向散射测量过程中，目前使用较为广泛的 2 种定标方式分别为分时定标技术与同时定标技术。同时定标技术是指将待测目标和定标体同时放置在雷达的观测区域，且互不产生遮挡，并在空间上存在隔离，这样可以通过数据处理的手段分离出目标的信号和定标体的信号，利用定标体的解析解，求出雷达实时的 N_{RCS} ，由此可以准确计算目标的 RCS。这种方法的优点是可以消除雷达自身的功率幅度不稳定对 RCS 测量带来的影响，但由于目前太赫兹雷达的观测静区很小，以至于目标与定标体无法在互不遮挡的情况下且有位置隔离地放置，所以本次实验采用分时定标的方法进行目标 RCS 测量。

分时定标法是将目标与定标体分时放置在雷达的测量区域进行测量。一般先对定标体进行测量，然后对待测目标进行测量，在对 2 个物体的测量过程中要严格保证除测量目标更换之外，实验场景没有变化，才能够保证定标的可靠性。由于目标近场 RCS 测量的结果是观测距离的函数，若雷达位置稍有变化，通过对定标体测量计算获得的 N_{RCS} 将不再适用。并且在保证测量环境不变的情况下，可以采用基于频域的背景对消技术降低背景噪声与杂波对目标 RCS 测量带来的影响。

3 测量系统及实验环境

3.1 太赫兹雷达系统

本实验采用的系统为微波倍频源太赫兹目标特性测量系统，雷达的电磁波源的基础频率为 13.75 GHz，经过 32 倍频后，其工作中心频率为 0.44 THz，发射功率为 4.7 mW，带宽为 25.6 GHz，脉冲宽度 100 μ s，采样频率为 40 MHz。雷达收发天线分置，可以有效降低发射天线的直漏信号的影响。收发前端在测量时间距为 5 cm，并列放置，中垂线指向测量目标，目标中心距离天线中心的位置为 3.5 m，雷达波束角为 14°，目标区域的太赫兹光斑直径为 54.55 cm，双站角为 2.6°，此时的 RCS 测量值可视为单站 RCS 测量的结果。

雷达主要由 4 部分组成，如图 1 所示，分别为零中频混频部分、信号采集部分、信号源部分以及电源部分。发射波形为调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)体制，接收为去调频接收体制，采用双路正交混频的下变频方式，在较低频段进行数据采集。

3.2 实验环境

测量实验场景如图 2 所示。配合全方位的 RCS 测量，实验使用了精密转台。该转台可与采集系统联动控制，使其可以以 1° 的间隔稳定地步进旋转，在转台旋转至下一角度并静止时，雷达工作，进行数据的采集，采集完成后转台转动到下一目标角度。转台的载重为 10 kg，可以满足实验所采用目标的要求。

转台上放置了 80 cm 高的低散射泡沫支架，避免金属转台进入雷达波束范围内，对 RCS 的测量结果产生影响。实验的暗室环境全面覆盖了适用于太赫兹波段电磁波的吸波材料，实验的转台、地面、天花板以及四周的墙壁均布满该吸波材料。吸波材料的几何形状也

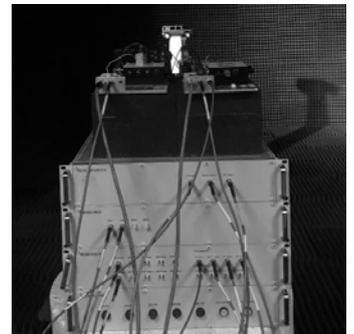


Fig.1 Main component of the radar
图 1 雷达主要组成部分



Fig.2 Measurement experiment scene
图 2 测量实验场景

可吸收掉大量的电磁波能量，且其中含有碳粉，可吸收一部分电磁波。采用吸波材料后，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。

4 系统定标与目标 RCS 测量

4.1 系统定标

使用直径为 20 cm 的光滑表面金属球进行测量，由于球的直径远远大于太赫兹波段的电磁波波长，其 RCS 测量结果处于光学区。对于全尺寸目标的 RCS，单位一般为 m^2 ，但由于该实验目标尺寸较小，同时为保证数据的精确度，采用 cm^2 作为本次实验的单位。可以利用式(8)计算获得 2 个金属球的 RCS 的理论值为：

$$\sigma = \pi r^2 \quad (8)$$

根据雷达方程可知，雷达的接收回波功率只与系统常数和雷达散射截面积有关，可以通过接收的目标回波功率谱强度来计算系统的 N_{RCS} 值，则

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} = \frac{\sigma}{N_{\text{RCS}}} \quad (9)$$

式中： P_r 为接收信号的功率； P_t 为发射信号的功率； G_r 为接收天线增益； G_t 为发射天线增益； λ 为信号的波长； σ 表示目标的 RCS。把回波功率谱响应作为 P_r ，即目标的测量值。获得了该球体的 RCS 理论值与使用该雷达系统获得的功率谱响应结果，通过式(7)可以获得测量系统的 N_{RCS} 值。

对大球以及无目标背景环境的情况进行数据采集。采用基于频域的背景对消技术降低背景环境中转台、后墙等强散射物体的干扰。

4.2 典型目标的 RCS 测量与结果

完成系统定标之后，将待测目标置于转台中心，配合高精度转台，以 1° 的间隔采用步进旋转的方式，对典型人造目标进行水平方向上 360° 的 RCS 测量。使用吉普车高逼真缩比模型和战斗机高逼真缩比模型，所测量模型均为金属材质，能够较好地为目标进行模拟。对目标测量得到的数据采用基于频域的背景对消技术处理。由于复杂目标的 RCS 是观测角度和工作频率的复杂函数，并且电磁波的频率越高，

RCS 随角度变化越敏感。所以测量得到的 RCS 结果起伏较为剧烈。将测量结果进行左右各 2° 的平滑处理，得到典型目标平滑后的 RCS 极坐标图，如图 3 所示，并通过计算获得目标的 RCS 的结果为： $\sigma = P_r N_{\text{RCS}}$ 。

图(3)左为平滑处理之后的战斗机缩比模型的 RCS 测量结果，可以看出战斗机模型正对雷达方向为 0° ，在图中可以明显地看出当在 90° 和 270° 时，即为 2 个机翼分别正对雷达时的 RCS 测量结果，在这两个方向上战斗机缩比目标模型的 RCS 测量值约为 60 cm^2 ，并且明显大于其他方向的 RCS 测量值，尾部正对雷达时的 RCS 值约为 40 cm^2 ，也大于其他角度正对雷达时的测量结果，经过资料的对比可知，该结果与理论结果吻合。

再对吉普车的数据进行类似处理与分析。吉普车在水平方向上的 RCS 平滑后的测量结果如图 3 右所示，车头正对雷达方向设定为 0° 。由此结果可以看出，当吉普车的 4 个表面分别正对雷达时，其 RCS 与其他角度的 RCS 相对较大，侧面与尾部正对雷达时，其 RCS 测量结果均达到 60 cm^2 左右，由于吉普车模型正面存在一定的弧度，且相对于雷达的观测方向，正面的上半部分与下半部分又有一个较大的距离变化，所以正面远非一个平面，其 RCS 测量值小于其他 3 个平面正对雷达时的 RCS 测量值。这与预期 RCS 的结果再次良好吻合，说明了系统的稳定性以及对典型人造目标的 RCS 测量结果的准确性。

5 结论

本文使用基于微波倍频源太赫兹宽带雷达系统配合高精度转台，在暗室环境中，采用分时定标技术对具有实际意义的典型目标缩比模型进行了水平方向上的全方位 RCS 近场测量。测量结果与理论吻合较为良好，具有一定

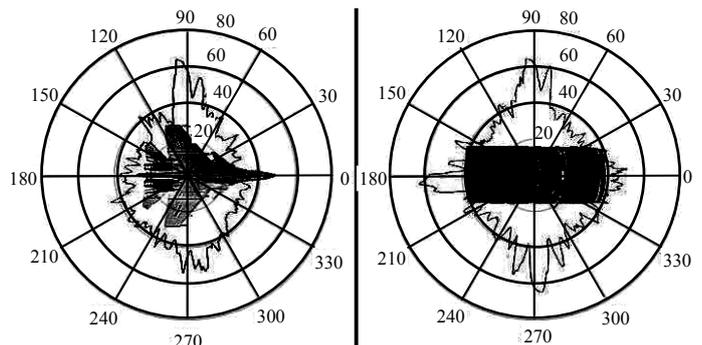


Fig.3 Measurement results

图 3 测量结果

的参考价值。同时证明了该太赫兹雷达系统的稳定性较为良好,可以在此基础上进行进一步研究。

参考文献:

- [1] 高敬坤,王瑞君,邓彬,等. THz 频段粗糙导体圆锥的极化成像特性[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(3):401-408. (GAO Jingkun,WANG Ruijun,DENG Bin,et al. Characteristics of polarized imaging of a conducting cone with surface roughness at terahertz frequencies[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(3): 401-408.)
- [2] 段素青,楚卫东,杨宁,等. 太赫兹量子级联激光器有源区增益分析和设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(1): 16-20. (DUAN Suqing,CHU Weidong,YANG Ning,et al. Design of the active region gain of the terahertz quantum cascade lasers[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(1):16-20.)
- [3] COULOMBE M J,HORGAN T,WALDMAN J,et al. A 160 GHz polarimetric compact range for scale model RCS measurements[C]// Proceedings of Antenna Measurements & Techniques Association. Seattle,WA:[s.n.], 2007:239.
- [4] DEMARTINIS G B,COULOMBE M J,HORGAN T M,et al. A 240 GHz polarimetric compact range for scale model RCS measurements[Z]. Massachusetts University Lowell Submillimeter-wave Technology Laboratory, 2010.
- [5] COULOMBE M J,HORGAN T,WALDMAN J,et al. A 524 GHz polarimetric compact range[Z]. Massachusetts University Lowell Submillimeter-wave Technology Laboratory, 1999.
- [6] COULOMBE M J,FERDINAND T,HORGAN T,et al. A 585 GHz compact range for scale model RCS measurements[Z]. Massachusetts University Submillimeter-wave Technology Laboratory, 1993.
- [7] DEMARTINIS G B,GOYETTE T M,COULOMBE M J,et al. A 1.56 THz spot scanning radar range for fully polarimetric W-band scale model measurements[Z]. Massachusetts University Submillimeter-wave Technology Laboratory, 2000.
- [8] 武亚君,黄欣,徐秀丽,等. 太赫兹目标 RCS 缩比测量技术[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(6):1541-1544. (WU Yajun, HUANG Xin,XU Xiuli,et al. Terahertz target RCS reduction measurement technology[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(6):1541-1544.)
- [9] 杨洋,姚建铨,张镜水,等. 粗糙铜表面对低频太赫兹波的散射实验[J]. 红外与毫米波学报, 2013,32(1):36-39. (YANG Yang,YAO Jianquan,ZHANG Jingshui,et al. Scattering experiment of low frequency terahertz waves on rough copper surface[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2013,32(1):36-39.)
- [10] 杨洋. 太赫兹波在粗糙金属球体目标上的散射特性[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(6):783-787. (YANG Yang. Scattering properties of terahertz waves on rough metal spherical targets[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(6):783-787.)
- [11] 杨洋,姚建铨,钟凯. 太赫兹雷达散射截面测量中定标体的确定[J]. 激光与红外, 2014(10):1149-1153. (YANG Yang, YAO Jianquan,ZHONG Kai. Determination of calibrator in terahertz radar cross section measurement[J]. Laser and Infrared, 2014(10):1149-1153.)
- [12] 李东起,李彦鹏,宋炎,等. 太赫兹目标 RCS 测量误差估计方法及其应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(5): 711-715. (LI Dongqi,LI Yanpeng,SONG Yan,et al. Application of measurement error estimation method for terahertz target's RCS[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(5):711-715.)
- [13] 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, 2004. (HUANG Peikang,YIN Hongcheng,XU Xiaojian. Radar target characteristics[M]. Beijing:Electronic Industry Press, 2004.)

作者简介:



宋炎(1993-),男,黑龙江省鹤岗市人,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:songyan_souen@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.

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.

李东起(1992-),男,四川省南充市人,硕士,主要研究方向为太赫兹雷达散射截面测量.

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.