

## 低频太赫兹标准目标雷达散射截面的实验研究

杨洋<sup>1</sup>, 姚建铨<sup>2</sup>, 王力<sup>1</sup>, 张镜水<sup>3</sup>, 刘婧<sup>3</sup>

(1. 承德石油高等专科学校 河北省仪器仪表工程技术研究中心, 河北 承德 067000;

2. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072; 3. 首都师范大学 物理系, 北京 100048)

**摘要:** 以研究太赫兹雷达散射截面的特性为目的, 选用所搭建低频太赫兹雷达测试系统, 并借助于标准目标法开展了有关太赫兹雷达粗糙铝盘散射截面的实验研究工作。实验结果表明: 在小角度散射中太赫兹雷达散射截面随散射角的增大变化比较明显, 在散射角超过 $5^\circ$ 后太赫兹雷达散射截面随散射角的变化趋向缓慢, 但当散射角超过 $12^\circ$ 后探测信号的强度已衰减到无法测量, 在太赫兹雷达散射截面的测试中没有出现微波雷达散射截面的大小随散射角的变化而剧烈振荡的现象; 将测试结果与同尺寸微波、激光雷达散射截面的结果进行了对比, 得出结论: 在 $0^\circ$ 附近太赫兹雷达散射截面的数值比同尺寸微波雷达散射截面的数值要小两个数量级, 但比同尺寸激光雷达散射截面的数值要高一个数量级。

**关键词:** 太赫兹雷达散射截面; 标准目标; 收发同置; 目标散射

**中图分类号:** TP212 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)03-0985-05

## Experimental study on the radar cross section of low-frequency terahertz standard target

Yang Yang<sup>1</sup>, Yao Jianquan<sup>2</sup>, Wang Li<sup>1</sup>, Zhang Jingshui<sup>3</sup>, Liu Jing<sup>3</sup>

(1. Hebei Instrument and Meter Engineering Technology Research Center of Chengde Petroleum College, Chengde 067000, China;

2. College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

**Abstract:** For study the characteristics of terahertz radar scattering cross section, by building a low-frequency terahertz radar test system, and with the help of standard target method, experiments and research work about terahertz radar scattering cross section of rough aluminum plate were carried out. The experimental results show that: In the small angle scattering, terahertz radar scattering cross section changes much obviously with the increase of the scattering angle; But when the scattering angle is more than  $5^\circ$ , terahertz radar scattering cross section varies with the scattering angle tends to be slow; And when the scattering angle is more than  $12^\circ$ , the detection signal strength attenuation cannot be measured. The phenomenon that microwave radar scattering cross section size changes with the angle of scattering while acuteness oscillation does not appear in the testing of terahertz radar scattering cross section. Comparison of the test results with the same size of microwave and laser radar cross section, it can be

收稿日期: 2014-07-11; 修订日期: 2014-08-14

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2007CB310403)

作者简介: 杨洋(1958-), 男, 教授, 博士, 主要从事激光雷达与太赫兹雷达目标散射特性研究。Email: yangy1958@sohu.com

the concluded: In the vicinity of  $0^\circ$ , the magnitude of terahertz radar scattering cross section is two orders lower than the same size microwave radar scattering cross section, but is an order higher than the same size laser radar scattering cross section.

**Key words:** terahertz RCS; standard target; monostatic; scattering

## 0 引言

雷达散射截面是表征目标对照射电磁波散射能力的一个物理量。太赫兹雷达标准散射截面实验研究是伴随着太赫兹技术的发展而发展起来的,进入 21 世纪有关太赫兹目标特性的研究工作得到国内外专家的重视,并成为近十年的一项重点研究工作领域,目标散射特性中最重要的就是雷达散射截面,通过雷达散射截面可以获得目标的形状、体积、姿态、表面材料的电参数与表面粗糙度等物理量。在国际上,从 2000 年开始美国、丹麦、德国等科学家先后开展了太赫兹雷达散射截面的理论研究和实验测量,得到一系列有价值的结论<sup>[1-3]</sup>,我国研究太赫兹雷达目标特性的研究工作要较西方国家晚 10 年左右。2010 年,电子工程学院陆益敏等围绕太赫兹在风沙及烟尘中的散射特性进行了研究<sup>[4]</sup>,2013 年国防科学技术大学王瑞君等开展了不同表面结构特征圆柱导体的太赫兹散射特性的研究工作<sup>[5]</sup>,2014 年北京航空航天大学华厚强等人发表了自由空间导体目标的太赫兹 RCS 高频分析方法的相关内容<sup>[6]</sup>。上述研究内容更多的是从理论上对太赫兹的散射特性及太赫兹雷达散射截面的特性做了定性分析。文中利用所确定太赫兹雷达散射截面的定标体,对粗糙金属标准目标体的雷达散射截面进行了定量测量,并通过对同一目标体的激光雷达、微波雷达散射截面的理论结果加以对比,得到了一系列有价值的结论。

## 1 太赫兹雷达实验测试系统

实验测试系统的结构示意图如图 1 所示。

实验测试系统中的太赫兹源采用返波管振荡器源(BWO),其工作频率为 206.2 GHz,输出功率为 40 mW;探测器使用焦热电探测器,最佳调制频率为 10~30 Hz,工作的光谱范围为 0.1~10 THz,像素大小为 2 mm×3 mm;测试系统中的数据读取单元用来获得

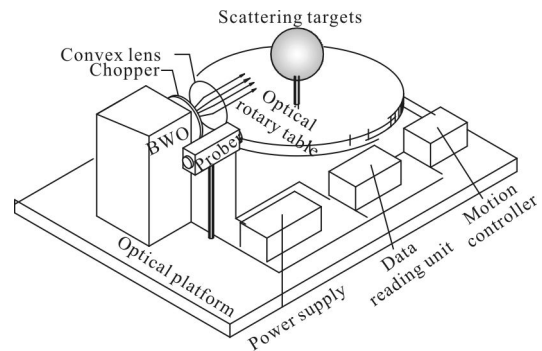


图 1 太赫兹目标雷达散射截面实验系统框图

Fig.1 Experimental system block diagram about Terahertz radar cross section

焦热电探测器的电压信号;小型自动旋转光学平台由“电动旋转台”和“运动控制器”组成,可实现不同入射角和散射角的测试工作,且整个测试工程可以实现程序控制。该光学平台的精度达到  $18''(0.005^\circ)$ ,转速为  $20^\circ/\text{s}$ ,传动比为 180:1,平台直径为 600 mm。为了安放散射目标体,在旋转光学平台上安放一个目标支撑架,与此同时为了减少支撑架造成的背景信号的影响,要对包括支撑架及背景进行降噪声影响的处理。

## 2 测试过程

整个雷达散射截面的测试过程包括:太赫兹光斑大小的测量、实验方法的确定、测试条件、太赫兹雷达散射截面的定标体的确定、实验数据的获取等过程。测量中太赫兹的光斑大小的确定是很多人使用过的刀刃法<sup>[7]</sup>,按照测量数据的分析与计算结果得知该实验系统的太赫兹源的光斑直径  $D=5.2\text{ cm}$ ,因此,只有被选作目标的尺寸小于 5.2 cm 时,目标才能被看做点目标,从而才可以开展测量目标的太赫兹雷达散射截面的研究工作。此次实验的测量方法采用在激光雷达散射截面测量中被广泛采用的“标准目标法”<sup>[8]</sup>。所谓标准目标法就是为了消除易变因素对  $\sigma$  测量的影响,在距离雷达  $R_0$  处放置一太赫兹雷达散射截面为  $\sigma_0$  的标准目标,其中  $\sigma_0$ 、 $R_0$  均为已知

量, 则根据雷达方程最终推得待测目标的雷达散射截面为:

$$\sigma = \frac{P_r}{P_0} \sigma_0 \quad (1)$$

式中:  $P_0, P_r$  分别为标准目标和待测目标的散射对探测器所测得的光功率。因为  $P_0, P_r$  可由探测器的响应度得到: 即  $P_r = R_v V_r, P_0 = R_v V_0$ , 则上式变为:

$$\sigma = \frac{V_r}{V_0} \sigma_0 \quad (2)$$

式中:  $V_r, V_0$  分别为测量目标及标准目标探测器的输出电压。

测试条件如下:

测试系统中太赫兹源的波长为  $\lambda = 1.5 \text{ mm}$ , 重复频率为  $10 \text{ Hz}$ , 雷达体制为收发同置, 目标距发射接收天线距离  $R$  为  $0.60 \text{ m}$ , 目标处太赫兹光斑直径为  $52 \text{ mm}$ 。

利用上述测试条件, 并选定表面粗糙、半径  $a = 15.0 \text{ mm}$  的金属铝球作为太赫兹雷达散射截面的定标体, 而待测目标体则确定为铝质, 形状为直径为  $30.0 \text{ mm}$  圆形的标准目标, 如图 2 所示。



图 2 粗糙铝板圆形目标

Fig.2 Circular target of rough aluminum

所得到的测试数据如表 1、2 所示。

表 1 粗糙金属铝球型标准体散射截面测量数据

Tab.1 Measurement data about ball-type standard scattering cross section of rough aluminum

Signal type	Output voltage/mV					Average voltage/mV
Probe signal	0.179	0.181	0.193	0.183	0.186	0.189
	0.188	0.193	0.196	0.203	0.188	
Noise signal	0.099	0.100	0.102	0.101	0.103	0.101
Actual signal	Detection signal averages - Noise signal averages					0.088

表 2 粗糙金属圆形铝平板目标散射截面测量数据

Tab.2 Measurement data about round flat standard scattering cross section of rough aluminum

Scattering angle $\beta$	0°	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°
Output voltage/mV	3.260	1.654	0.366	0.216	0.114	0.160	0.118	0.145	0.124	0.143	0.139	0.140	0.130
	3.277	1.652	0.360	0.196	0.116	0.153	0.124	0.147	0.126	0.135	0.145	0.131	0.141
	3.286	1.673	0.368	0.210	0.120	0.158	0.122	0.154	0.120	0.128	0.135	0.124	0.132
	3.278	1.656	0.364	0.198	0.118	0.157	0.120	0.150	0.128	0.138	0.141	0.132	0.140
Average value/mV	3.282	1.670	0.366	0.212	0.116	0.154	0.126	0.152	0.122	0.132	0.139	0.130	0.131
	3.277	1.661	0.365	0.211	0.117	0.157	0.122	0.150	0.124	0.135	0.140	0.131	0.135

表 2 给出了作为被测量目标的粗糙金属圆形铝平板在不同入射角的太赫兹雷达散射截面的测量数据, 铝平板为圆形, 直径为  $3.00 \text{ cm}$ 。

依据表 2 数据可以得到在不同散射角时的直径为  $3.00 \text{ cm}$  金属平板的雷达散射截面的实验值  $\sigma$ 。

与此同时, 利用电磁散射相关理论和红外辐射理论可以得到: 当目标为金属球且其半球反射率在红外范围为  $0.38$  时, 所选定的太赫兹标准体的雷达散射截面的解析解趋于一致<sup>[9]</sup>, 即:

$$\sigma_0 = \pi a^2 \quad (3)$$

因此根据此次实验数据可得到  $\sigma_0 = \pi a^2 = 7.065 \text{ cm}^2$ ,

同时由表 1 得到  $V_0 = 0.088 \text{ mV}$ 。

利用公式(2)和表 2 的数据, 可以得到不同散射角的雷达散射截面  $\sigma$ 。

以散射角  $\theta$  为横坐标,  $10 \lg \sigma$  为纵坐标, 将其绘成实验曲线如图 3 所示。

为了便于比较, 可得到金属平板在高频下的雷达散射截面的理论公式为<sup>[10]</sup>:

$$\sigma = \frac{\pi a^2}{\tan^2 \theta} \left[ J_1 \left( \frac{4\pi a \sin \theta}{\lambda} \right) \right]^2 \quad (4)$$

利用公式(4)可以得到的不同散射角金属平板雷达散射截面高频近似解的理论值。以角度  $\theta$  为横

标,  $10\lg\sigma$  为纵坐标画出实验曲线如图 4 所示。

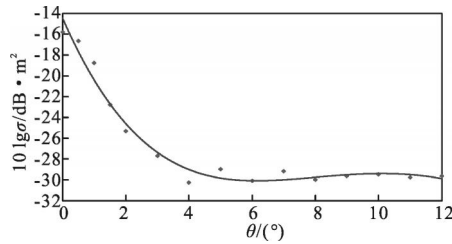


图 3 粗糙金属铝平板太赫兹雷达目标散射截面测量曲线图

Fig.3 Measurement curve of terahertz radar target scattering cross section on rough aluminum flat

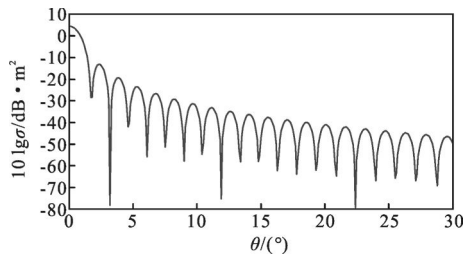


图 4 金属平板微波雷达散射截面理论曲线图

Fig.4 Theoretical curve of microwave radar cross section on metal plate

同样为了便于比较, 还知道粗糙金属表面对红外的散射规律是遵从朗伯定律的, 雷达散射截面随角度的关系是呈余弦平方规律的变化<sup>[11]</sup>。并可求出面积为  $S$  的朗伯平板的雷达散射截面:

$$\sigma = \int_S 4\pi f_r \cos^2\theta ds = 4\rho_{2\pi} \cos^2\theta \int_S ds = 4Sp_{2\pi} \cos^2\theta \quad (5)$$

因此利用公式(2)、(4)、(5)可以分别定量得到同一目标体在红外、微波、太赫兹不同领域的雷达散射截面。

### 3 结论

从实验曲线和实验数据中可以看出太赫兹雷达散射截面与散射角的关系, 根据相关理论经过对上述实验结果的分析, 可以得出如下一些结论:

(1) 太赫兹雷达散射截面与散射角的变化关系与激光雷达散射截面情况不同, 在小角度散射中激光雷达散射截面随散射角的增大缓慢变小, 而太赫兹雷达散射截面与散射角的增大迅速变小; 与此同时, 太赫兹雷达散射截面与散射角的关系与微波雷达散射截面情况也有所不同, 在小角度散射中微波雷达散射

截面随散射角表达而呈现出变小的速度比太赫兹雷达散射截面随散射角的变小的速度更加迅速。

(2) 在散射角超过  $5^\circ$  后, 太赫兹雷达散射截面随散射角的变化缓慢变化, 没有出现微波雷达散射截面大小随散射角的变化而剧烈振荡的现象, 但也会在一些角度附近出现小幅起伏的现象; 同时实验曲线显示太赫兹雷达散射截面与散射角的函数曲线与微波雷达散射截面相应的函数曲线的包络线相类似。

(3) 实验数据显示, 在  $0^\circ$  附近太赫兹雷达散射截面的数值比同尺寸微波雷达散射截面的数值要小两个数量级, 但比同尺寸激光雷达散射截面的数值要高一个数量级, 说明太赫兹波的散射具有其自身的特性。

(4) 此次实验尽管也考虑了降低环境影响, 但环境影响没有完全消除, 在一定程度上对实验结果带来一定影响; 其次由于测量测试系统的测量精度的限制, 此次实验只对小角度的雷达散射截面进行了测量, 当散射角变大后信号迅速衰减, 导致雷达散射截面的数值无法得到。

### 参考文献:

- [1] McGowan R W, Chevillet R A, Grischkowsky D R. Experimental study of the surface waves on a dielectric cylinder via terahertz impulse radar ranging [J]. *IEEE Trans Microwave Theory & Techn*, 2000, 48(3): 471-418.
- [2] Iwaszczuk K, Heiselberg H, Jepsen P U. Terahertz radar cross section measurements [J]. *Opt Express*, 2010, 18(25): 26399-26408.
- [3] Jansen, Krumbholz N, Geisbet R, et al. Alignment and illumination issues in scaled THz RCS measurements [C]// 34th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2009.
- [4] Lu Yimin, Wang Jiachun, Shi Jiaming, et al. Application of THz technology for detecting in soot and wlowndind-blown sand[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(3): 487-490. (in Chinese)  
陆益敏, 汪家春, 时家明, 等. 太赫兹技术在烟尘与风沙探测中的应用[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(3): 487-490.
- [5] Wang Ruijun, Deng Bin, Wang Hongqiang, et al. Scattering characteristics for cylindrical conductor with different surface micro-structure in terahertz regime with different surface in

- terahertz regime microstructure [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(6): 1549–1554. (in Chinese)
- 王瑞君, 邓彬, 王宏强, 等. 不同表面结构特征圆柱导体的太赫兹散射特性[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(6): 1549–1554.
- [6] Hua Houqiang, Jiang Yuesong, Su Lin, et al. High-frequency analysis on THz RCS of complex conductive targets in free space [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (3): 687–693. (in Chinese)
- 华厚强, 江月松, 苏林, 等. 自由空间导体目标的太赫兹 RCS 高频分析方法 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(3): 687–693.
- [7] Su Hong, Zhou Hang, Chen Qiongzhou, et al. Beam profile and frequency distribution characterization of broadband terahertz wave [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2010, 27(2): 167–171. (in Chinese)
- 苏红, 周航, 陈琼州, 等. 宽带太赫兹波光束轮廓和频率分布特性[J]. *深圳大学学报理工版*, 2010, 27(2): 167–171.
- [8] Yang Yang. Experimental study on the lidar scattering cross section of point target [J]. *Journal of Chengde Petroleum College*, 2003, 5(3): 35–38. (in Chinese)
- 杨洋. 点目标激光雷达散射截面的实验研究[J]. *承德石油高等专科学校学报*, 2003, 5(3): 35–38.
- [9] Yang Yang, Yao Jianquan, Song Yukun, et al. The radar scattering cross section of different wave band for spherical targets [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41 (5): 552–556. (in Chinese)
- 杨洋, 姚建铨, 宋玉昆, 等. 球型目标在不同波段的雷达散射截面[J]. *激光与红外*, 2011, 41(5): 552–556.
- [10] He Guoyu, Lu Caicheng, Hong Jiakai, et al. Calculation and Measurement of Electromagnetic Scattering [M]. Beijing: Beihang University Press, 2006. (in Chinese)
- 何国瑜, 卢才成, 洪家才, 等. 电磁散射的计算和测量[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
- [11] Yang Yang, Wang Xiaoou, Chen Lixue, et al. Experimental study of target scattering characteristic of lidar for 1.06  $\mu\text{m}$  [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2000, 29 (3): 52–59. (in Chinese)
- 杨洋, 王晓鸥, 陈历学, 等. 1.06 激光雷达目标散射特性的实验研究[J]. *红外与激光工程*, 2000, 29(3): 52–59.