不同粗糙度抛物面的 2.52 THz 后向散射测量

樊长坤,李 琦,赵永蓬,陈德应

(哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要:太赫兹后向散射特性是表征目标对太赫兹波散射能力的一个重要参数。在实际应用中抛物 面形状占据了重要位置,而在 2.52 THz 频率下的相关散射特性的研究至今处于空白。利用已搭建的 测量系统对直径为 50、60、70、80 mm,粗糙度为 3.2、6.3、12.5 μm 等的抛物面进行了太赫兹后向散射 的测量。利用 MATLAB 软件对数据进行处理并得出目标的太赫兹后向散射特性曲线。利用控制变量 法分别研究尺寸和粗糙度对目标太赫兹后向散射的影响。随着尺寸的增大,目标的散射特性曲线下降 变缓,在 3°附近出现的凸起越来越明显。用示波器在所测角度边缘观察信号波形表明信号处于可测 状态。后向散射测量实验结果表明,测量动态范围最大可达 22 dB,最大误差约为 0.15 dB。 关键词:太赫兹; 测量; 散射; 粗糙度

中图分类号: TN29 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.1125005

Measurement of 2.52 THz back scattering in different roughness paraboloid

Fan Changkun, Li Qi, Zhao Yongpeng, Chen Deying

(National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Terahertz back scattering properties is a very important index to represent the target's scattering ability of terahertz. Paraboloid occupies an important position in practical applications, but the correlational studies on 2.52 THz target back scattering properties still remain untouched so far. The back scattering measurement experiments on paraboloid with diameter of 50, 60, 70 and 80 mm based on measurement system were conducted. The roughness of paraboloid was 3.2, 6.3, 12.5 μ m and so on. The MATLAB software was used to deal with the data and the target back scattering properties curve was got. The controlling variable method was used to study size and roughness effects of target terahertz back scattering properties. Target back scattering properties curve dropped slowly as it grew in size, and the lug boss nearby 3° was becoming more and more obvious. The signal waveform of measuring angle edge was observed by the oscillograph which proved the signal was available. Back scattering experiment results show that the maximum measurement dynamic range is 22 dB and the maximum measurement error is about 0.15 dB.

Key words: terahertz; measurement; scattering; roughness

收稿日期:2017-03-05; 修订日期:2017-04-03

作者简介:樊长坤(1992-),男,硕士生,主要从事太赫兹目标散射特性测量方面的研究。Email:hit_fanchangkun@qq.com 导师简介:李琦(1963-),女,教授,博士,主要从事激光雷达及太赫兹成像方面的研究。Email:liqi2013@hit.edu.cn

0 引 言

随着太赫兹雷达技术的发展,对太赫兹目标散 射特性的测量研究日益受到关注^[1-3]。太赫兹散射特 性测量的对象主要包括球、圆柱体、平板等标准体以 及飞机、坦克等缩比模型^[4-7]。

Richard J 等人利用频率为 100、160、350 GHz 的 测量系统对球面反射镜进行了测量,测量范围是-70°~ 70°^[4]。Krzysztof Iwaszczuk 等人利用飞秒激光器组成 的 0.1~2 THz 时域光谱系统进行了缩比 1:150 的 F-16 飞机金属模型的雷达散射截面(RCS)测量^[5],分别 测量了飞机模型水平放置和垂直放置时的 360°的 RCS 曲线。美国亚毫米波技术实验室利用两支 CO₂ 激光泵浦气体 THz 激光器构成的逆合成孔径激光 雷达系统,对 BMP-2 步兵战车的缩比模型进行了测 量^[6]。美国亚毫米波技术实验室利用信号合成器组成 的紧缩场系统,进行了 7 种吸收材料的 0.16 THz 后向 散射特性研究^[7]。材料包括雷克斯雷达吸波材料等,每种材 料尺寸为 24 in×24 in(1 in=2.54 cm)。

2013年,电子科技大学蒋彦文等人进行了基于 时域光谱系统太赫兹频率的雷达散射界面的测量^[8]。 北京航空航天大学的华厚强等人研究了自由空间 复杂导体目标的太赫兹雷达散射截面的高频求解 方法^[9]。黄欣等利用 110~325 GHz RCS 幅相测量系 统对 E-2C 预警机模型进行了测量^[10]。梁达川等利 用钛宝石飞秒激光器搭建的 0.1~1.3 THz 宽频时域 太赫兹雷达系统对 M3A2 布拉德利装甲车模型、辽 宁号航空母舰模型和 F-22 隐形战斗机模型进行了测 量^[11]。杨洋等利用返波管振荡器源搭建的 206.2 GHz 测量系统对粗糙金属圆形铝平板进行了测量,圆板直 径 3 mm,测量范围 0~12°,扫描步长 1°^[12]。

由于 CO₂ 激光泵浦气体太赫兹激光器输出 2.52 THz 是其最为稳定的工作频率之一,笔者课题 组曾搭建了束宽约 100 mm 的太赫兹目标散射特性 测量系统,利用此系统分别对粗糙度为1.6、3.2、6.3、 12.5 μm 的方形铝板进行了测量^[13]。实验结果表明, 相同尺寸不同粗糙度铝板后向散射最大值变化很 小,随着粗糙度增大,后向散射从高点下降,斜率有增 大趋势。利用参考文献[13]的测量装置,文中对这一 频率下不同粗糙度的抛物面的后向散射特性进行了 测量。

1 测量系统介绍

1.1 测量装置介绍

测量装置如图 1 所示^[13]。实验中使用的太赫兹 光源为 Coherent 公司 SIFIR-50 激光器,工作频率 2.52 THz,输出功率约 50 mW。光束经过由 P1-P2、 P3-P4 组成的准直放大系统后束宽约 100 mm,光束 照射目标后由离轴抛面镜 P5 将目标散射回波聚焦 到俄国生产的单元高莱探测器上,由数据采集卡读 取数据。为了防止回波信号强度过大损坏探测器,在 光路中增添衰减片 A。目标体和校准物置于电动位 移台上,由计算机软件控制其移动和转动。探测系统 光路主体由屏蔽舱包围。为防止激光器输出功率波 动对测量结果的影响,在每次对实验目标测量的同 时增添对校准目标的测量,由此计算两者的比值来 作为实验目标此角度下的相对散射特性强度。



图 1 测量装置图^[13] Fig.1 Measurement setup^[13]

测量一组数据采用多次测量方法,一般测量10次。 设测得校准目标的散射回波平均值为*S*_c、标准差为 *V*_c,其他待测物体的散射回波平均值*S*_t、标准差为 *V*_t。则待测物体相对校准目标的平均散射回波强度 *R*_c可表示为:



其标准差 V_{tc} 可表示为:

$$V_{\rm tc} = \sqrt{\frac{1}{S_{\rm c}^2} V_{\rm c}^2 + \frac{S_{\rm c}^2}{S_{\rm t}^2} V_{\rm t}^2}$$
(2)

然后,对 R。取对数获得待测目标的相对散射特性。其计算公式为:

$$R=10\lg(R_c)(dB) \tag{3}$$

其标准差V为:

$$V = \frac{10}{\ln 10} \frac{V_{\rm tc}}{R_{\rm c}} (\rm dB) \tag{4}$$

1.2 测量软件介绍

利用已编写好的软件来实现对目标的控制和测量^[14-15]。测量软件总界面如图 2 所示^[14-15]。该软件可以实现对目标物和校准物的平移以及对目标物的旋转,并且实时显示物体位置坐标。能够直接测量信号的峰峰值,并能求出每组数据的平均值和标准差。可以设定斩波器频率、采样倍率、幅值选择和测量次数等测量参数。利用此软件的自动测量功能可将控制和测量结合,并根据测量的数据提醒用户是否更换衰减片。



图 2 控制测量软件总界面 Fig.2 Controlling measurement software total interface

2 抛物面的测量结果和分析

首先,对直径50 mm、深度为 11 mm 粗糙度 Ra 为 1.6、3.2、6.3、12.5 μm 的抛物面进行测量,实物照 片如图 3 所示。扫描范围是-6°-6°,扫描步长 0.4°。 后向散射特性强度曲线如图 4 所示,其测量最大值 和最小值如表 1 所示。在探测角度为 6°时用示波器 对信号的波形进行观察,示波器截图如图 5 所示,可 以看出:此时 10 Hz 的简谐波信号还没有被噪声湮 没,峰峰值为 532 mV,信号处于可测范围。



图 3 直径 50 mm 不同粗糙度抛物面照片

Fig.3 Different roughness paraboloid photo with diameter 50 mm



图 4 直径 50 mm 不同粗糙度抛物面散射特性曲线

Fig.4 Different roughness paraboloid scattering properties curve with diameter 50 mm

表 1 直径 50 mm 不同粗糙度抛物面的最大值和 最小值

Tab.1 Different roughness paraboloid maximum and minimum with diameter 50 mm

Roughness/µm	1.6	3.2	6.3	12.5
Max/dB	8.8872	7.713 1	8.4224	6.6563
Min/dB	-4.2254	-4.2885	-4.289	-4.253 1
Max error/dB	0.1155	0.108 0	0.1165	0.1269



图 5 测量角度 6°示波器信号波形

Fig.5 Oscilloscope signal waveform of 6°

Ra 为 1.6 μm 的抛物面的最大值为 8.887 dB, 最

小值为-4.225 dB,最大误差为±0.116 dB。Ra为3.2µm 的抛物面的最大值为7.713 dB,比 Ra1.6µm的最大值 小约1.2 dB,最小值为-4.289 dB,与 Ra1.6µm 的最小 值相差无几,最大误差为±0.108 dB。Ra为6.3µm 的 抛物面的最大值为8.422 dB,比 Ra1.6µm的最大值小 约0.5 dB,比 Ra3.2µm 的最大值大约0.7 dB,最小值 为-4.289 dB,与 Ra1.6µm 和 Ra3.2µm 的最小值相 差无几,最大误差为±0.117 dB。Ra为12.5µm 的抛物 面的最大值6.656 dB,比 Ra3.2µm 的最大值小约 1.1 dB,比 Ra6.3µm 的最大值小约2.2 dB,最小值 为-4.253 dB,与 Ra1.6 Ra3.2µm 的最大值小约

从图 4 和表 1 可以看出,除了 *Ra*6.3 μm 外,最 大值随着粗糙度的增大而减小,4 种粗糙度的最小 值相差不大,粗糙度大的两侧的值会略大。信号在 0~2°迅速下降,曲线比较平滑。

然后,对直径 60 mm,深度 15 mm,粗糙度 *Ra*3.2、6.3、12.5 μm 的抛物面进行测量,扫描范围是 0°~6°,扫描步长 0.4°。后向散射特性强度曲线如图 6 所示,其测量最大值和最小值如表 2 所示。





Fig.6 Different roughness paraboloid scattering properties curve with diameter 60 mm

表 2 直径 60 mm 不同粗糙度抛物面的最大值和 最小值

Tab.2 Different roughness paraboloid maximumand minimum with diameter 60 mm

Roughness/µm	3.2	6.3	12.5
Max/dB	15.462	14.867	15.051
Min/dB	-2.111	-2.094	-3.432
Max error/dB	0.129	0.155	0.123

Ra 为 3.2 μm 的抛物面的最大值为 15.462 dB, *Ra* 为 6.3 μm 的抛物面的最大值为 14.867 dB,比 *Ra*3.2 μm 的最大值小约 0.6 dB,*Ra* 为 12.5 μm 的抛 物面的最大值为 15.051 dB,比 *Ra*3.2 μm 的最大值小 约 0.4 dB,比 *Ra*6.3 μm 的最大值大约 0.2 dB。*Ra*3.2 μm 和 *Ra*6.3 μm 最小值分别为-2.111 dB 和-2.094 dB, 两者相差不大。*Ra*12.5 μm 最小值为和 3.432 dB,比 *Ra*3.2 μm 的最小值大约 1.3 dB。最大误差分别为 ±0.129 、±0.155 和±0.123 dB。

从图 6 和表 2 可以看出,4 种粗糙度的最大值 和最小值相差不大,粗糙度大的两侧的值会略大。相 比于 *Ra*1.6 μm 曲线在 0~2°下降变缓,并且曲线不再 平滑,在 1.2°附近出现小突起。

图 7 给出直径 70 mm、深度 20 mm 的抛物面的 测量后向散射特性强度曲线,扫描范围和步长同上, 其测量最大值和最小值如表 3 所示。



图 7 直径 70 mm 不同粗糙度抛物面散射特性曲线

Fig.7 Different roughness paraboloid scattering properties curve with diameter 70 mm

表 3 直径 70 mm 不同粗糙度抛物面的最大值和 最小值

Tab.3 Different roughness paraboloid maximum

and minimum with diameter 70 mm

Roughness/µm	3.2	6.3	12.5
Max/dB	18.189	17.242	16.869
Min/dB	-2.724	-2.969	-2.533
Max error/dB	0.110	0.100	0.093

Ra 为 3.2 μm 的抛物面的最大值为 18.189 dB, *Ra* 为 6.3 μm 的抛物面的最大值为 17.242 dB,比 *Ra*3.2 μm 的最大值小约 0.9 dB, *Ra* 为 12.5 μm 的抛 物面的最大值为 16.865 dB,比 *Ra*6.3 μm 的最大值小 约 0.4 dB。*Ra* 为 3.2 µm 最小值为-2.724 dB,*Ra* 为 6.3 µm 最小值为-2.969 dB,*Ra* 为 12.5 µm 的最小值 为-2.533 dB, 三者相差不大。最大误差分别为 为±0.110、±0.100、±0.093 dB。

从图 7 和表 3 可以看出,最大值随着粗糙度的 增大而减小,3 种粗糙度的最小值相差不大。相比于 *Ra*3.2μm 曲线下降更缓,在 2°附近出现了明显的突起。

最后,对直径 80 mm、深度 25 mm 的抛物面进行 测量,扫描范围和步长同上。其测量结果如图 8 所 示,其测量最大值和最小值如表 4 所示。



图 8 直径 80 mm 不同粗糙度抛物面散射特性曲线

Fig.8 Different roughness paraboloid scattering properties curve with diameter 80 mm

表 4 直径 80 mm 不同粗糙度抛物面的最大值和 最小值

Tab.4 Different roughness paraboloid maximum and minimum with diameter 80 mm

Roughness/µm	3.2	6.3	12.5
Max/dB	19.579	18.729	17.950
Min/dB	-2.347	-2.485	-2.114
Max error/dB	0.100	0.100	0.118

Ra 为 3.2、6.3、12.5 μm 的抛物面的最大值分别 为 19.579、18.729、17.950 dB。*Ra*6.3 μm 比 *Ra*3.2 μm 的最大值小约 0.8 dB, *Ra*12.5 μm 比 *Ra*6.3 μm 的最大 值小约 0.8 dB。三者的最小值分别为-2.347、-2.485、 -2.114 dB, 相差不大。最大误差分别为±0.100、±0.100、 ±0.118 dB。

从图 8 和表 4 可以看出,最大值随着粗糙度的 增大而减小,3 种粗糙度的最小值相差不大。相比于 前面的测量结果,曲线下降最缓,在 2°附近曲线甚 至不再单调递减。 直径 50 mm 抛物面的测量动态范围最大能达到约 13 dB,直径 60 mm 抛物面的测量动态范围最大能达到约 18 dB,直径 70 mm 抛物面的测量动态范围最大能达到约 21 dB,直径 80 mm 抛物面的测量动态范围最大能达到约 22 dB。最大误差约为 0.15 dB。

3 结 论

利用已搭建好的测量系统对直径 50、60、70、 80 mm,粗糙度 Ra3.2、6.3、12.5 μm 等的抛物面进行 了太赫兹后向散射的测量实验,得出了目标的后向 散射特性曲线。实验结果表明,在测量边缘角度信号 波形仍没有被噪声湮没,处于可测范围。通过控制变 量法分别研究了尺寸和粗糙度对目标后向散射特性 曲线的影响。最高点会随着粗糙度的增大而降低。在 直径为 50 mm 抛物面的实验结果中曲线平滑快速下 降,随着尺寸的增大,下降趋势变缓,同时在 3°附近 出现凸起,在直径为 80 mm 抛物面的实验结果中曲 线已经变得不再单调下降。直径为 50、60、70、80 mm 的抛物面的最大动态范围分别是 13、18、21、22 dB, 测量最大误差约为 0.15 dB。

参考文献:

- Williams R J, Gatesman A J, Goyette T M, et al. Radar cross section measurements of frequency selective terahertz retroreflectors[C]//SPIE, 2014, 9102: 91020R.
- [2] DiGiovanni D A, Gatesman A J, Giles R H, et al. Backscattering of ground terrain and building materials at millimeter-wave and terahertz frequencies [C]//SPIE, 2013, 8715: 871507.
- [3] Li Qi, Xue Kai, Li Huiyu, et al. Advances in research of terahertz radar cross section measurements [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(6): 060001. (in Chinese) 李琦, 薛凯, 李慧宇, 等. 太赫兹雷达散射截面测量研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(6): 060001.
- [4] Gente R, Jansen C, Geise R, et al. Scaled bistatic radar cross section measurements of aircraft with a fiber-coupled THz time-domain spectrometer[J]. *IEEE T THz Sci Techn*, 2012, 2(4): 424–431.
- [5] Iwaszczuk K, Heiselberg H, Jepsen P U. Terahertz radar cross section measurements [J]. *Opt Express*, 2010, 18(25), 26399–26408.
- [6] Goyette T M, Dickinson J C, Waldman J, et al. A 1.56 THz

compact radar range for W-band imagery of scale-model tactical targets[C]//SPIE, 2000, 4053: 615-622.

- [7] Wu C, Gatesman A J, DeRoeck L, et al. Terahertz backscattering behavior of various absorbing materials [C]// SPIE, 2009, 7311: 73110M.
- [8] Jiang Yanwen, Deng Bin, Wang Hongqiang, et al. RCS measurement of cylinders in terahertz band based on the time-domain spectroscopy system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2223–2227. (in Chinese) 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.
- [9] 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. 自由空间复杂导体目标的太赫 兹 RCS 高频分析方法 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 687–693.
- [10] Huang Xin, Wu Yajun, Wang Xiaobing, et al. Terahertz radar cross section measurement technique [J]. Space Electronic Technology, 2013, 24(4): 104-109. (in Chinese) 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, 24(4): 104-109.
- [11] Liang Dachuan, Wei Minggui, Gu Jianqiang, et al. Broadband time domain terahertz radar cross-section research in scale models[J]. *Acta Phys Sin*, 2014, 63(21): 214102. (in

Chinese)

梁达川,魏明贵,谷建强,等. 缩比模型的宽频时域太赫兹 雷达散射截面 (RCS)研究 [J]. 物理学报, 2014, 63(21): 214102.

- [12] Yang Yang, Yao Jianquan, Wang Li, et al. Experimental study on the radar cross section of low-frequency terahertz standard target[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (3): 985–989. (in Chinese)
 杨洋,姚建铨, 王力, 等. 低频太赫兹标准目标雷达散射截 面的实验研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 985–989.
- [13] Fan Changkun, Li Qi, Zhao Yongpeng, et al. Measurement of 2.52 terahertz back scattering in aluminium plates with four kinds of roughness [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(11): 111201. (in Chinese) 樊长坤,李琦,赵永蓬,等. 4 种粗糙度铝板的 2.52 太赫兹 后向散射测量 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(11): 111201.
- [14] Fan Changkun, Li Qi, Zhou Yi, et al. Controlling software development of CW terahertz target scattering properties measurements based on LabVIEW [C]//Proceedings of the International Symposium on Optoelectronic Technology and Application(OTA16), 2016.
- [15] Li Qi, Fan Changkun, Zhao Yongpeng, et al. Controlling software improvement of terahertz target scattering measurements and experiment [C]//Proceedings of the 8th International Symposium on Ultrafast Phenomena and Terahertz Waves, 2016.

第11期