

4种粗糙度铝板的2.52 THz后向散射测量

樊长坤 李琦 周毅 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 太赫兹目标散射特性是表征目标对太赫兹波散射能力的一个重要指标。搭建了束宽约100 mm的带有屏蔽舱的2.52 THz目标散射测量系统。利用该系统分别对粗糙度 R_a 为1.6, 3.2, 6.3, 12.5 μm , 宽为40 mm和45 mm的铝方板进行了后向散射的测量实验。通过对数据的分析以及与理论公式的对比, 验证了此系统的可行性。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。

关键词 测量; 散射; 太赫兹; 粗糙度

中图分类号 TN29 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.111201

Measurement of 2.52 THz Back Scattering in Aluminium Plates with Four Kinds of Roughness

Fan Changkun Li Qi Zhou Yi Zhao Yongpeng Chen Deying

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

Abstract Terahertz target scattering characteristic is a very important index to represent the target's scattering ability of Terahertz. A system to measure target's scattering characteristic of 2.52 THz is established. The system has a shield compartment, and the beam's waist width is about 100 mm. With this system, a back scattering measurement experiment is conducted on square plates whose roughness R_a are respectively 1.6, 3.2, 6.3, 12.5 μm . The square plates are 40 mm and 45 mm wide. Through analyzing the experimental data and comparing them with the theoretical formula, the feasibility of this system is verified. The experimental results show that the back scattering's maximum value of the aluminum plates with different roughnesses changes little, when the size of the aluminum plates is the same. While the roughness increases, the back scattering declines from the peak and the gradient trends greater.

Key words measurement; scattering; terahertz; roughness

OCIS codes 120.5820; 290.1350; 040.2235

1 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主要针对球、圆柱体等标准体和飞机、坦克等缩比模型。按所用太赫兹源可划分为4类: 基于时域谱系统的太赫兹源^[4-6]、CO₂激光抽运气体太赫兹激光器^[7-9]、信号合成器或网络分析仪、量子级联激光器。Iwaszczuk K等^[6]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。入射波和接收的散射回波夹角为6.6°。这是迄今为止利用太赫兹时域光谱

收稿日期: 2016-07-12; 收到修改稿日期: 2016-07-27; 网络出版日期: 2016-10-20

作者简介: 樊长坤(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事太赫兹目标散射特性测量方面的研究。

E-mail: hit_fanchangkun@qq.com

导师简介: 李琦(1963—), 女, 博士, 教授, 主要从事激光雷达与太赫兹成像等方面的研究。

E-mail: liqi2013@hit.edu.cn(通信联系人)

系统测量 RCS 频率范围最大,且目标最复杂的一次实验研究。黄欣等^[10]研制了 110~325 GHz 收发子系统,并完成了对标准体、飞机和舰船目标缩比模型的 RCS 测量研究。

Goyette T M 等^[7]利用两支 CO₂ 激光抽运气体太赫兹激光器构成的逆合成孔径激光雷达系统,进行了坦克、导弹发射车模型的 0.35 THz 成像实验。激光器典型输出功率 50 mW。运动控制台还放置有校准目标和场内校准目标。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。

对于散射特性的测量,从太赫兹工作频率看,利用太赫兹时域谱系统的工作频率范围最广为 0.1~2.6 THz;利用两支 CO₂ 激光抽运气体太赫兹激光器的工作频率有 0.16,0.35,1.56 THz;利用信号合成器的工作频率有 0.16,0.35 THz;量子级联激光器的测量频率在 2.4,2.6 THz。

梁达川等^[11]和杨洋等^[12]分别利用太赫兹时域谱 0.1~1.3 THz 和返波管振荡器 0.2 THz 进行了目标特性测量,但尚未进行粗糙度比较研究。江月松等^[13]进行了基于快速物理光学法的太赫兹目标 RCS 计算。

由于 CO₂ 激光抽运气体太赫兹激光器输出的 2.52 THz 是其最为稳定的工作频率之一,因此,曾利用束宽约 10 mm 的装置进行过几种背景材料的散射特性实验^[14]。由于窄束宽装置对较大有限尺寸的目标的后向散射无法测量,因此本文搭建这一频率下约 100 mm 束宽的带有屏蔽舱的后向散射测量装置。借鉴参考文献[6]的 90°和 15°离轴抛物面镜相结合的光路设计,减少实验装置体积。借鉴参考文献[8]中运动控制台设计,加装校准目标克服系统噪声,尤其是激光器波动噪声。对 4 种粗糙度的纯铝方板和圆板的后向散射特性进行了测量。

2 系统装置及测量原理

实验装置如图 1 所示。

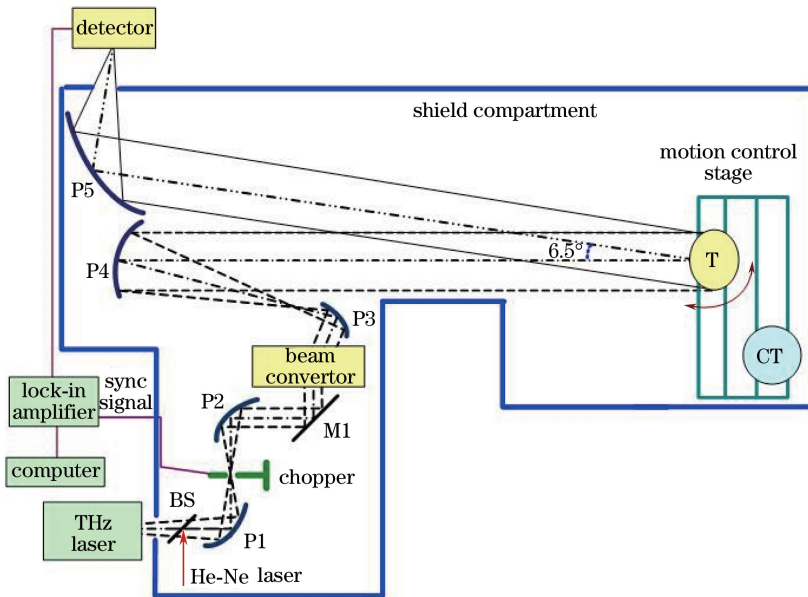


图 1 测量装置

Fig. 1 Measurement setup

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。使用 5 个镀金的离轴抛物面镜 P1~P5,其中 P4 为 15°离轴抛物面镜,其余为 90°离轴抛物面镜。15°离轴抛物面镜的优势主要在于能缩小系统的体积。型号相同的 P1 和 P2 组成准直镜组,对激光器输出光束进行初级准直,其光束束宽约 10 mm;斩波器置于 P1 和 P2 焦点,从而减少斩波器造成的能量损耗,其频率 10 Hz。P1 距离激光输出窗口约为 180 mm,P2 至平面镜 M1 距离约为 95 mm。P3 和 P4 组成终级准直放大镜组,放大倍数 10 倍,光束束宽约 100 mm。P3 和 P4 焦距分别为 50.8 mm 和 516.8 mm,通光孔径分别约 50 mm 和 101 mm。为了提高入射光波距光学平台距离,同时便于 P4 和 P5 镜的装调,在 M1 和 P3 之间加上了光束转换器。使光轴到光学平台距离提高到 235 mm。由 P4 最终准直后的束宽约为 100 mm 的光束照射目标 T,由焦距 152.4 mm 的离轴抛物面镜 P5 将置于运动控制平台上的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。入射波光轴和 P5 的回波中心夹角约为 6.5° 。P4 至目标距离约为 1200 mm。BS 为高阻单晶硅片,厚度约为 0.5 mm,对 2.52 THz 光的透过率约为 99%。He-Ne 光用作指示光,用于系统光路的调节。运动控制平台由两个精密电动平移台和两个精密电动转台及其控制器和支架组成。精密电动平移台和精密转台组成二维平台,支架置于转台上;两个转台上的支架与 P4 入射目标的光轴垂直,且高度相同。待测目标 T 和校准目标 CT 分别置于各自的支架上。校准目标的作用是测量待测目标时也测量校准目标,即以校准目标为参照物,从而减少背景噪声和激光波动对测量结果的影响。探测系统光路主体由屏蔽舱包围,屏蔽舱吸波材料为角锥状橡胶。

探测器接收到的后向散射信号经过与斩波器同步的锁相放大器放大,最终由置于计算机内的外设连接接口(PCD)数据采集卡将模拟信号采集并转化为数字信号。

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_n 、标准差为 V_n ,其他待测物体的散射回波平均值为 S_o 、标准差为 V_o 。则待测物体相对校准目标的平均散射回波强度 R_n 可表示为

$$R_n = \frac{S_o}{S_n} \quad (1)$$

其标准差 V_{on} 可表示为

$$V_{on} = \sqrt{\frac{1}{S_n^2} V_o^2 + \frac{S_o^2}{S_n^4} V_n^2} \quad (2)$$

然后,对 R_n 取对数获得待测目标的相对散射特性,其计算公式为

$$R = 10 \lg R_n, \quad (3)$$

其标准差 V 为

$$V = \frac{10}{\ln 10} \frac{V_{on}}{R_n} \quad (4)$$

3 测量结果及分析

对粗糙度 Ra 分别为 1.6, 3.2, 6.3, 12.5 μm 且厚度均为 3 mm 的纯铝方板进行了后向散射测量。测量角度分别为 $0^\circ \sim 30^\circ$ 和 $0^\circ \sim 3^\circ$, 每次旋转角度分别为 1° 和 0.1° 。

图 2 给出宽 40 mm 粗糙度 Ra 分别为 1.6, 3.2, 6.3, 12.5 μm 的方板照片。其中下部多出的部分用于夹持,测量时不能被测到。

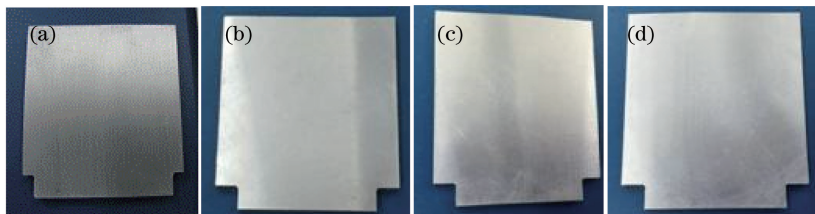


图 2 宽 40 mm 粗糙度 Ra 为(a) 1.6 μm , (b) 3.2 μm , (c) 6.3 μm , (d) 12.5 μm 的方板照片

Fig. 2 Photos of square plates with width of 40 mm and roughness Ra of (a) 1.6 μm , (b) 3.2 μm , (c) 6.3 μm , (d) 12.5 μm

图 3 给出宽 40 mm 不同粗糙度方板测量结果。表 1 给出测量的最大值和最小值。

表 1 宽 40 mm 方板不同粗糙度的最大值和最小值

Table 1 Maximum and minimum of different roughness for square plates with width of 40 mm

Roughness / μm	Maximum in 3° /dB	Minimum in 3° /dB	Maximum in 30° /dB	Minimum in 30° /dB
1.6	17.88	-0.3207	17.3	-1.42
3.2	17.6	-0.1412	17.11	-1.709
6.3	17.85	-1.13	17.98	-1.491
12.5	17.81	-1.16	17.84	-1.651

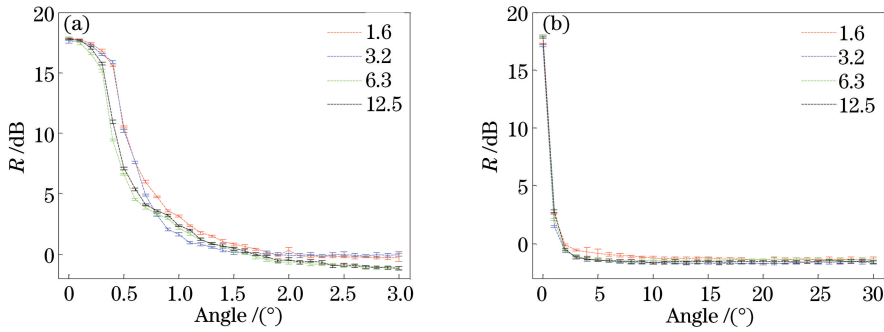


图3 宽40 mm不同粗糙度方板测量结果

Fig. 3 Measurement results of different, roughness for square plates with width of 40 mm

$Ra1.6$ 的方板后向散射最大值分别为17.3 dB和17.88 dB,最小值分别为-1.42 dB和0.3207 dB,最大误差为 ± 0.3862 dB;两次测量的最大值相差约0.5 dB。 $Ra3.2$ 的方板后向散射最大误差为 ± 0.1823 dB;两次测量的最大值相差也约0.5 dB。最大值比 $Ra1.6$ 的方板略低,最大相差约0.2 dB。 3° 测量值低于 $Ra1.6$ 的方板约0.4 dB。 $Ra6.3$ 的方板后向散射最大误差为 ± 0.1527 dB;两次测量的最大值相差约0.2 dB;比 $Ra1.6$ 的方板略高,最大相差约0.2 dB。 3° 测量值低于 $Ra1.6$ 的方板约1.4 dB。 $Ra12.5$ 的方板后向散射最大误差为 ± 0.1539 dB;两次测量的最大值相差0.03 dB,与 $Ra1.6$ 的方板相差无几。 3° 测量值低于 $Ra1.6$ 的方板约1.5 dB。

从图3和表1可以看出,这4种粗糙度方板测量的最大值差不多,且在 $0^\circ \sim 3^\circ$ 内从最大值下降到最小值的斜率有随着粗糙度的增大而增大的趋势。

图4给出宽45 mm不同粗糙度方板测量结果。表2给出测量的最大值和最小值。

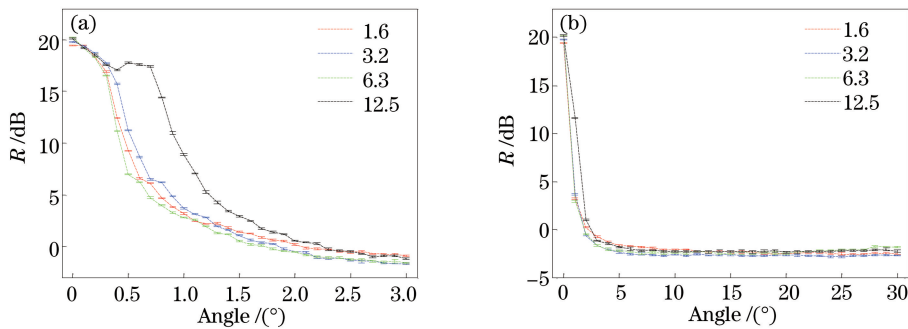


图4 宽45 mm不同粗糙度方板测量结果

Fig. 4 Measurement results of different roughness for square plates with width of 45 mm

表2 宽45 mm不同粗糙度方板的最大值和最小值

Table 2 Maximum and minimum of different roughness for square plates with width of 45 mm

Roughness / μm	Maximum in 3° /dB	Minimum in 3° /dB	Maximum in 30° /dB	Minimum in 30° /dB
1.6	19.42	-0.8872	19.44	-2.552
3.2	19.77	-1.676	19.8	-2.819
6.3	20.21	-1.607	20.28	2.505
12.5	20.09	-1.139	20.18	-2.342

与40 mm宽方板情况类似,45 mm宽方板随粗糙度在 $0^\circ \sim 3^\circ$ 内有些变化,但 5° 以后趋于一致,在误差范围内浮动。主要原因是已到测量系统探测极限。 $Ra1.6$ 的45 mm宽方板后向散射最大值比40 mm板高约1.5 dB。 3° 测量值低于40 mm的方板约1.2 dB。 $Ra3.2$ 的45 mm宽方板后向散射最大值比 $Ra1.6$ 的方板略高约0.4 dB。 $Ra6.3$ 和 $Ra12.5$ 的方板后向散射最大值与其同大小的 $Ra1.6$ 的方板略高约0.8 dB。这些现象可能主要是由于测量误差和 $Ra1.6$ 平板 0° 位置定位不够准确。

从图4和表2可以看出, $Ra3.2$ 和 $Ra6.3$ 的方板的后向散射较 $Ra1.6$ 的方板在 $0^\circ \sim 3^\circ$ 下降大,最大点相

差不大。另外, $Ra 12.5$ 的方板在 $0.6^\circ \sim 0.8^\circ$ 出现近似相同数值且高于 0.5° , 这与其他粗糙度趋势相悖, 其主要可能性是此板面形和结构不合乎要求。

从以上两组不同尺寸的方板测量结果可以看出, 测量动态范围约 22 dB, 测量最大误差在 ± 0.5 dB 以内。测量主要误差来源于物体面形及物体 0° 的定位误差和激光器波动误差。

最后, 利用物理光学法计算了不同大小理想光滑平板的散射截面的零点最大值及其差值, 并与实际测量值及其差值相比较, 如表 3 所示。实验数据选取 $Ra 1.6$ 的方板的最大值的平均值。实验测得数据没有公式计算的值大, 其原因主要在于公式计算的属于理想光滑平板, 没有厚度, 而实际平板厚度为 3 mm。此理论计算并未考虑绕射等因素。比较不同大小平板之间的差值发现实验数据误差约 0.21 dB。

表 3 理想公式结果与实验数据比较

Table 3 Comparison between ideal formula results and experimental data

Width	Formula results /dB	Experimental data /dB
45 mm	35.62	19.43
40 mm	33.57	17.59
Difference	2.05	1.84

4 结 论

搭建了束宽约 100 mm 的带有屏蔽舱的 2.52 THz 目标散射测量系统。利用该系统分别对粗糙度 Ra 为 1.6, 3.2, 6.3, 12.5 μm 的宽为 40 mm 和 45 mm 的铝方板进行了后向散射的测量实验。通过对数据的分析以及与理论公式的对比, 验证了此系统的可行性。实验结果表明, 测量动态范围约 22 dB, 测量最大误差在 ± 0.5 dB 以内。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。与理想计算公式相比 45 mm 宽与 40 mm 宽方形板后向散射回波差约 0.21 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.
- Di G 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.
- 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.
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.
- 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.
- Mc G R W, Heville R A, Grischkowsky D R. Experimental study of the surface waves on a dielectric cylinder via terahertz impulse radar ranging[J]. IEEE T Microw Theory, 2000, 48(3): 417-422.
- Iwaszczuk K, Heiselberg H, Jepsen P U. Terahertz radar cross section measurements[J]. Opt Express, 2010, 18(25): 26399-26408.
- Goyette T M, Dickinson J C, Waldman J. A 1.56THz compact radar range for W-band imagery of scale-model tactical targets[C]. SPIE, 2000, 4053: 615-622.
- Jagannathan A, Gatesman A J, Horgan T, *et al.* Effect of periodic roughness and surface defects on the terahertz scattering behavior of cylindrical objects[C]. SPIE, 2010, 7671: 76710E.
- Wu C, Gatesman A J, DeRoeck L, *et al.* Terahertz backscattering behavior of various absorbing materials[C]. SPIE, 2009, 7311: 73110M.
- Huang Xin, Wu Yajun, Wang Xiaobing, *et al.* Terahertz radar cross section measurement technique[J]. Space Electronic Technology, 2013, 4: 104-109.
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, 4: 104-109.
- Liang Dachuan, Wei Minggui, Gu Jianqiang, *et al.* Broad-band time domain terahertz radar cross-section research in scale

- models[J]. Acta Phys Sin, 2014, 63(21): 214102.
- 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.
- 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 Jiang Yuesong, Zhang Zhiguo, Hua Houqiang. RCS simulation of targets in THz band based on fast physical optics algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1211001.
- 江月松, 张志国, 华厚强. 基于快速物理光学法的太赫兹目标 RCS 计算[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1211001.
- 14 Li Qi, Yang Yongfa, Zhao Yongpeng, *et al.* Measurement investigation of continuous wave terahertz back scattering characteristics in three kinds of background materials[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(1): 011201.
- 李 琦, 杨永发, 赵永蓬, 等. 三种背景材料的连续太赫兹后向散射特性测量研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(1): 011201.