

# 太赫兹雷达散射截面测量研究进展

李琦 薛凯 李慧宇 陈德应 王骥

(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 150001)

**摘要** 太赫兹雷达散射截面(RCS)测量技术是当前太赫兹重要的应用技术之一。利用太赫兹源,不仅可以测得目标太赫兹波段的 RCS,还可以通过对缩比模型的 RCS 测量,获得微波波段全尺寸目标的 RCS 值。基于 RCS 定义及测量的一般要求,介绍了国外太赫兹 RCS 测量的主要成果;重点介绍三类测量装置及测量目标;给出部分代表性的测量结果。最后分析了利用飞秒激光器抽运晶体的太赫兹时域谱系统、CO<sub>2</sub> 激光抽运太赫兹激光器的逆合成孔径雷达系统和信号合成器的相干探测系统在工作频率、待测目标尺寸和小型化等方面的特点。为我国太赫兹 RCS 测量技术的发展提供技术借鉴。

**关键词** 激光技术;太赫兹;雷达散射截面;测量;缩比模型;紧缩场

**中图分类号** TN95 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.060001

## Advances in Research of Terahertz Radar Cross Section Measurements

Li Qi Xue Kai Li Huiyu Chen Deying Wang Qi

(National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable laser, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** Terahertz radar cross section (RCS) measurement is one of the most important techniques in terahertz applications. By using terahertz sources, the RCS of the targets and scale-models at terahertz band can be obtained, through which RCS of the full size targets at microwave band can also be calculated. Based on the definition of RCS and general requirements in the experiment, the main results of the terahertz RCS measurements abroad are provided. Three kinds of measuring facilities and targets and some typical measuring results are also emphasized. In the end, the characteristics in work frequency, size and miniaturization of targets and something else related when using terahertz time-domain spectrums system of femtosecond laser pumped crystal, inverse synthetic aperture radar system of CO<sub>2</sub> laser pumped terahertz laser and coherent detection system with signal synthesizer are analyzed respectively, too. It helps to provide reference for the development of terahertz RCS measurement technology in our country.

**Key words** laser technique; terahertz; radar cross section; measurement; scale-model; compact range

**OCIS codes** 290.5820; 290.1350; 280.5600; 290.1350

## 1 引言

太赫兹雷达较一般激光雷达具有适中的搜索能力和覆盖范围,较微波雷达具有更高的空间分辨率和角分辨率,而且具有良好的抗干扰能力,是目前国内外太赫兹技术的重点研究课题<sup>[1,2]</sup>。

雷达散射截面(RCS)是雷达中非常重要的参数,对雷达系统设计、目标识别、跟踪点选择和隐身技术等都具有重要的指导意义,因此备受关注<sup>[3~6]</sup>。由于理论计算不能准确得到目标的实际 RCS,因此,RCS 测量技术在雷达目标特性和 RCS 研究中占有十分重要的地位。通过对各种目标的 RCS 测量,不仅可以了解目标基本散射特性,检验理论分析的结果,更重要的是可以获得大量的目标特征数据,建立目标 RCS 数据库。

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受到更多关注。太赫兹 RCS 测量始于 20 世纪末,主要针对球、圆柱体等标准体和飞机、坦克等缩比模型。标准体测量结果可直接用于太赫兹雷

**收稿日期**: 2011-11-17; **收到修改稿日期**: 2012-01-04; **网络出版日期**: 2012-04-01

**作者简介**: 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: hit\_liqi@yahoo.com.cn

达,缩比模型测量结果通过频率缩比计算,可用于微波波段全尺寸目标 RCS 的评估。太赫兹缩比模型 RCS 测量可大幅度节约微波波段全尺寸目标 RCS 测量成本,同时缩短测量周期。此类应用是太赫兹 RCS 测量技术发展的主要动力。

我国尚未有关于太赫兹 RCS 测量的报道,而这方面的研究具有重要的实用价值。因此,本文对国外近 20 年的太赫兹 RCS 测量研究情况进行了介绍,为我国太赫兹 RCS 测量技术发展提供技术借鉴。

## 2 RCS 定义及测量一般要求

当目标被电磁波照射时,能量朝各个方向散射,定量表征目标散射强弱的物理量称为目标对入射雷达波的有效散射截面积,通常简称为目标的雷达截面。其定义为<sup>[7]</sup>

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_0|^2}, \quad (1)$$

式中  $E_0$  是照射到目标处的入射波电场强度,  $E_s$  是雷达所在处散射波的电场强度,  $R$  是雷达和目标间的距离。

太赫兹 RCS 测量系统包括辐射、探测、待测目标运动控制等子系统,要做到准确测量有很大难度。RCS 测量一般要求<sup>[7]</sup>:

1) 光束以均匀振幅和位相照射测试物体,一般入射光振幅在目标的横向和纵向范围偏差不得超过 0.5 dB,且相位偏差小于  $22.5^\circ$ 。

2) RCS 测量通过替代法进行校准,即在测试条件下将被测目标用已知散射特性的物体替代。该方法给出一个常数,通过此常数可将探测器示数变换成被测目标 RCS 的绝对值。

3) 因为残留的背景散射对所测得回波信号有污染,因此需减少背景散射,在测试光路环境内壁覆盖吸收材料;同时,目标支撑结构应专门进行低回波特性设计。

在缩比模型测量中,需要应用缩比定律。由于非导体与良导体的缩比规律不同,不能使由良导体和非导体构成的任意目标都满足所有的缩比要求。但是,实际上测量的缩比模型均为金属制品,因此,通常采用理想导体缩比定律<sup>[7]</sup>,即:当对波长的平方进行归一化,如果两个理想导体目标具有相同形状、不同尺寸,但具有相同的波数,则它们的 RCS 方位图将完全相同。

例如,如果模型缩比因子是 1:10,即模型是全尺寸目标的 1/10,应该以全尺寸频率的 10 倍进行测量。全尺寸目标的 RCS 是缩比模型 RCS 测量值乘以缩比因子的平方。

## 3 太赫兹 RCS 测量进展

按所用太赫兹源可划分为 3 类:飞秒激光器抽运晶体的太赫兹激光器,CO<sub>2</sub> 激光抽运气体太赫兹激光器,信号合成器或网络分析仪。

2000 年美国利用输出波长 820 nm 飞秒激光器组成的太赫兹时域光谱系统进行了 0.2~1.4 THz 辐射的导体和介质圆柱体 RCS 的测量<sup>[8]</sup>,实验光路如图 1 所示。由太赫兹源发射的脉冲激光经由焦距为  $f$  的离轴抛物面镜和全反镜组成的发射系统照射到目标上,从目标散射的部分回波经由全反镜和离轴抛物面镜组成的接收系统收集后,被探测器接收。太赫兹入射波和接收的散射回波的夹角  $\theta=13^\circ$ 。实验中,测量的介质圆柱体材质是氧化铝,直径 3 mm,并以直径 30 mm 的铜圆柱体作为参考目标。另外,利用改进的太赫兹时域光谱系统测量了直径为 6.36 mm 的氧化铝球的 RCS,实验结果和理论计算结果相吻合。

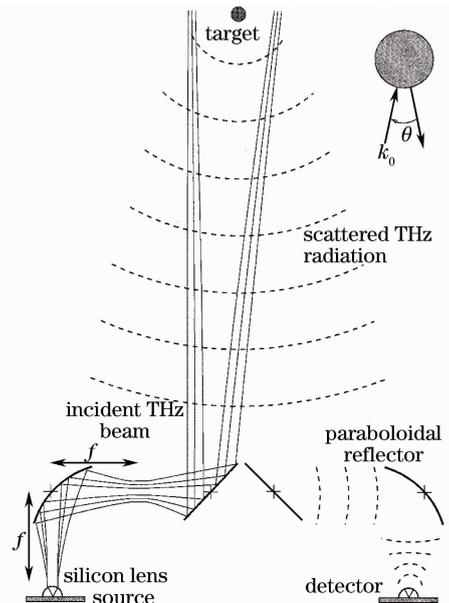


图 1 圆柱体 RCS 测量实验光路

Fig. 1 Light path of cylinder RCS scattering measure experiment

2009年德国也利用飞秒激光器组成的光纤耦合太赫兹时域光谱系统进行了 $15\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ 金属板的 $0.3, 0.5, 1\text{ THz}$ 的RCS测量<sup>[9]</sup>,入射角为 $-35^\circ$ ,散射角 $35^\circ$ 。在目标相对高斯光束束宽较小时,高斯光束可以近似为理想的平面波。为了研究高斯光束对RCS的影响,利用物理光学方法对 $30\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ 金属板进行了模拟计算;并将模拟结果与平面波计算结果相比对。实验中,他们测量了此太赫兹时域谱系统光束半峰全宽(FWHM)、强度轮廓随辐射频率的变化关系,如图2(a)所示。利用此测量结果,对高斯光束与平面波照射目标的RCS偏差进行了仿真研究,结果如图2(b)所示。图中实线代表高斯光束照明,点代表平面波照明。从RCS仿真结果可以看出,在目标相对高斯光束束宽较大时,采用高斯光束照明较平面波近似存在较大偏差。因此,在测量简单目标时可以通过理论计算进行校正;但在测量较复杂目标时,需要对系统进行改进,保证平面波近似条件。

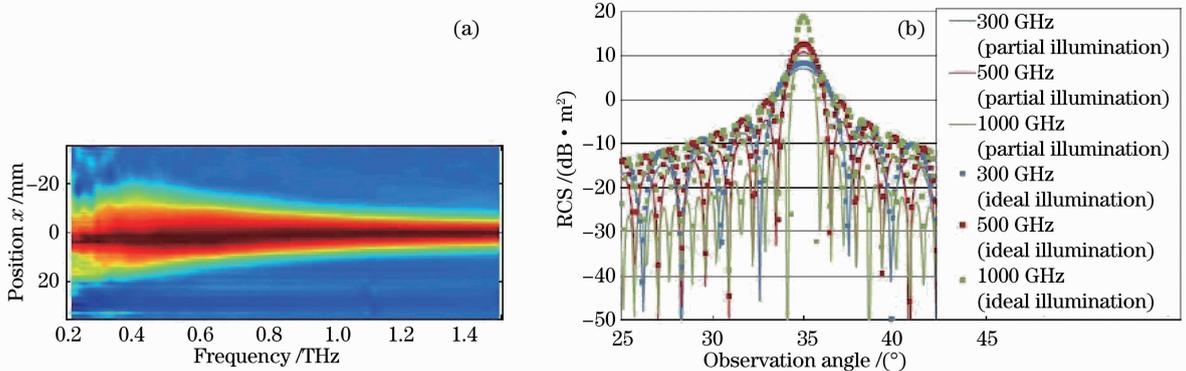


图2 高斯光束与平面波照射目标的RCS比较。(a) 太赫兹照射束宽和强度轮廓;(b) RCS

Fig. 2 Target irradiation result comparison between Gaussian beam and the plane wave.

(a) Beam width and strength profile of terahertz radiation; (b) RCS

2010年丹麦利用飞秒激光器组成的太赫兹时域光谱系统进行了缩比 $1:150$ 的F-16飞机金属模型的RCS测量<sup>[10]</sup>,图3给出其装置图及飞机模型照片,模型长 $10\text{ cm}$ ,翼展 $6.7\text{ cm}$ 。太赫兹辐射经一对焦距分别为 $25.4\text{ mm}$ 和 $516.8\text{ mm}$ 、直径分别是 $25.4\text{ mm}$ 和 $101.6\text{ mm}$ 的离轴抛物面镜扩束和准直。扩束后的太赫兹辐射传播 $1200\text{ mm}$ 后照射到放置在由计算机控制的旋转平台上的目标。在目标处太赫兹脉冲的FWHM为 $73\text{ mm}$ 。后向散射收集系统由直径为 $170\text{ mm}$ 的全反镜和直径为 $101.6\text{ mm}$ 焦距为 $152.4\text{ mm}$ 的离轴抛

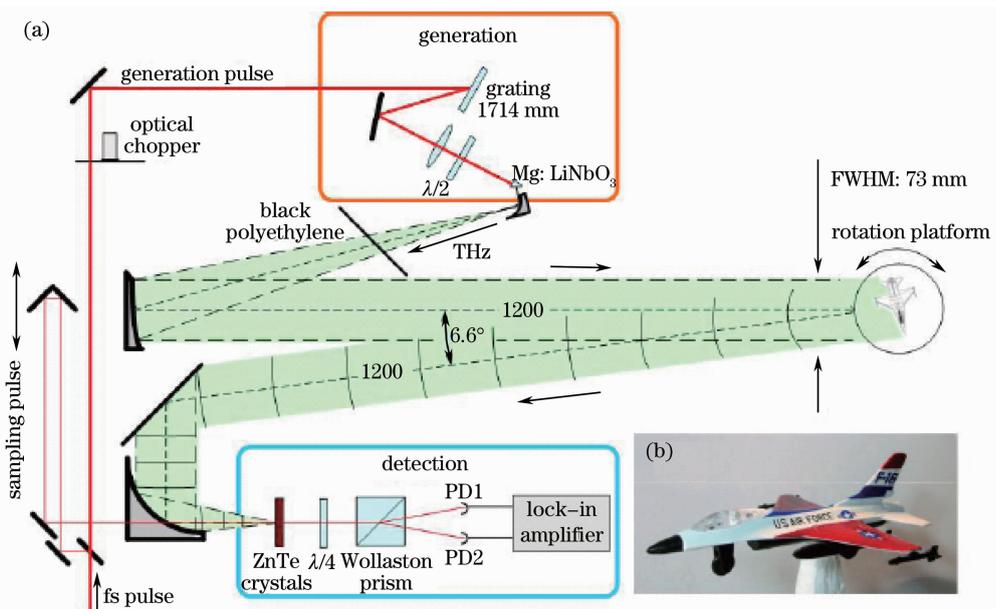


图3 丹麦测量RCS的装置图及飞机模型照片

Fig. 3 Danish schematic diagram of the RCS setup and the model of aircraft

面镜组成,收集到的后向散射聚焦后照射到 ZnTe 晶体上。目标散射到探测器的传输距离总共为 1430 mm,入射波和接收的散射回波夹角为  $6.6^\circ$ 。为避免光学平台散射对测量的影响,所有电磁辐射传输光路均高出平台 160 mm。800 nm 的探测光穿过图中的中间开孔的离轴抛物面镜照射到 ZnTe 晶体上,通过计算机控制时间延时,实现时域波形探测。图 4 分别给出取对数后的飞机模型水平、垂直转动的频率平均 RCS 方位图和 0.3、0.7、1.1 THz 时的 RCS 方位图<sup>[10]</sup>。校准后的测量装置分辨率为 0.2 mm。这是迄今为止利用太赫兹时域光谱系统测量 RCS 频率范围最大,且目标最复杂的一次实验研究。

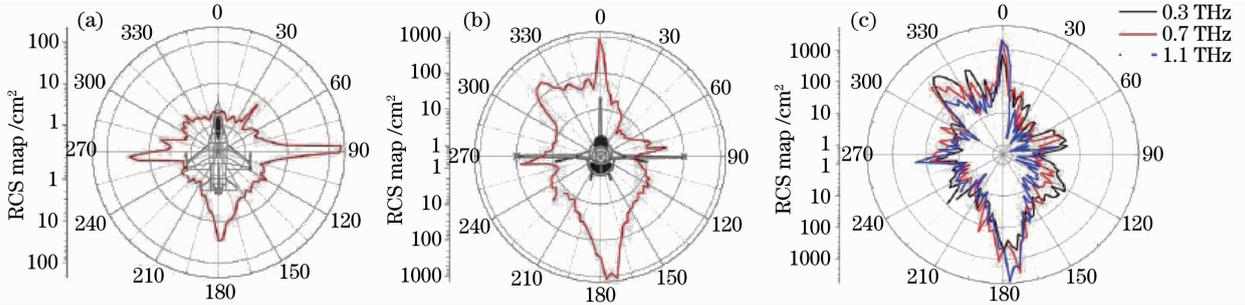


图 4 取对数后的 RCS 方位图。(a) 水平转动的频率平均 RCS; (b) 垂直转动的频率平均 RCS; (c) 0.3、0.7、1.1 THz 时 RCS 方位图

Fig. 4 Logarithm of azimuthal RCS. (a) Frequency-averaged RCS of the horizontal turn; (b) frequency-averaged RCS of the vertical turn; (c) azimuthal RCS at frequency 0.3, 0.7 and 1.1 THz

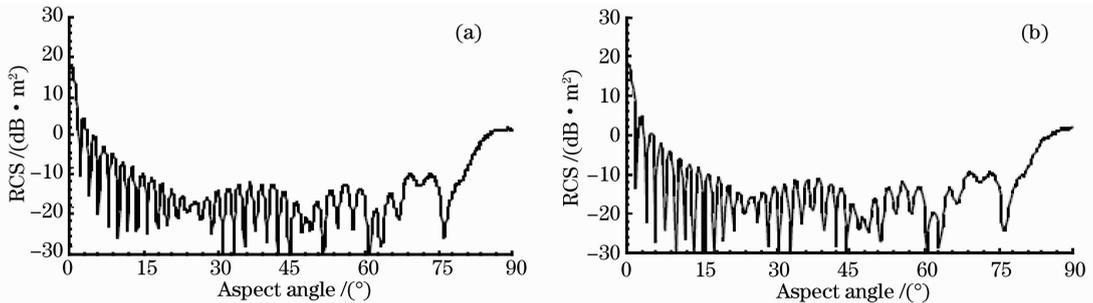


图 5 缩比和全尺寸平板的 RCS 测量结果对比。(a) 在 0.585 THz 的缩比平板测量结果; (b) 在 35 GHz 的全尺寸平板测量结果

Fig. 5 Comparison between scale plate and full size plate measuring results. (a) Scale plate measuring result at frequency 0.585 THz; (b) full-scale plate measuring result at frequency 35 GHz

美国亚毫米波技术实验室(STL)最早于 1993 年利用两支  $\text{CO}_2$  激光抽运气体太赫兹激光器构成的 0.585 THz 相干激光雷达建立了紧缩场 RCS 测量系统,对缩比 1:16.7 的平板和缩比 1:58.5 的矩形箱体这两种简单目标进行了全尺寸测量和缩比模型测量研究<sup>[11]</sup>。图 5 给出经缩比定律换算后的 0.585 THz 的 1:16.7 缩比平板测量结果和 35 GHz 全尺寸平板测量结果,显然结果非常吻合。0.585 THz 缩比 1:58.5 矩形箱体的测量结果同 10 GHz 全尺寸测量结果也相吻合。说明利用此装置通过缩比模型测量,可以较准确得到全尺寸目标对应的辐射波段的 RCS。同时,他们还作为复杂目标的军用车辆 1:16 缩比模型(如图 6 所示)进行了 0.585 THz 的 RCS 测量,理论计算和实际测量结果对比,如图 7 所示。可以看出,实测结果和理论计算结果较好地吻合<sup>[4]</sup>。

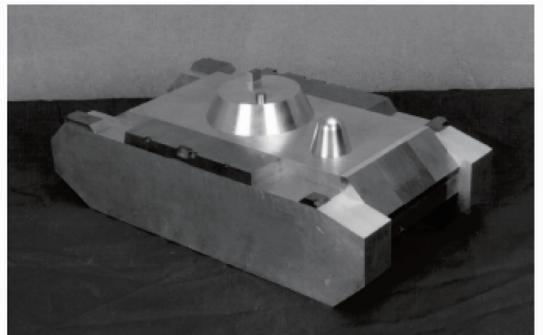


图 6 军用车辆缩比模型

Fig. 6 Scale model of military vehicles

2004 年美国 STL 利用两支  $\text{CO}_2$  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、

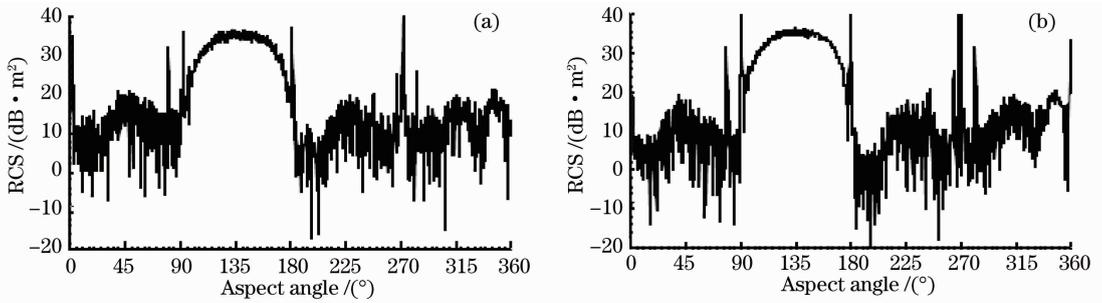


图 7 军用车辆缩比模型的理论计算和实际测量结果。(a) 测量结果;(b) 模拟计算结果

Fig. 7 Scale model of military vehicles simulation and measuring results. (a) Results of measurement; (b) results of simulation

飞机模型的 0.35 THz<sup>[12]</sup>和 1.56 THz<sup>[13]</sup>成像实验,实验装置如图 8 所示。整个系统包括两台太赫兹激光器、外差探测系统、运动控制台和太赫兹消音舱。目标物体放在运动控制台上,经扩束准直后的平行光束全部覆盖被测物体。激光器典型输出功率 50 mW,其 FWHM 为 19 mm。运动控制台还放置有校准目标和场内校准目标。其中校准目标是简单标准体(如球、平板、二面体、立方体、三面体),可以通过理论计算验证测量系统的准确性。场内校准目标采用体积很小的二面体,与待测目标同置于太赫兹辐射场中,用以克服由于激光器输出功率波动导致的测量误差。利用此装置实验研究了边长为 2.54 cm 的立方体的 0.35 THz 和 1:16 坦克缩比模型 1.56 THz 目标散射特性。图 9 给出利用 0.35 THz 测量(虚线)和理论计算(实线)X 波段倾角 0°时的 RCS;缩比因子为 1:35,此立方体等价 X 波段 RCS 为 38.8 dB·m<sup>2</sup> 目标。显然理论计算与测量结果相吻合。另外,2010 年他们在 0.35 THz 还研究了圆柱体的周期性粗糙和瑕疵对太赫兹散射的影响<sup>[14]</sup>。实验证明亚微米量级粗糙度目标能够通过太赫兹成像加以观察。

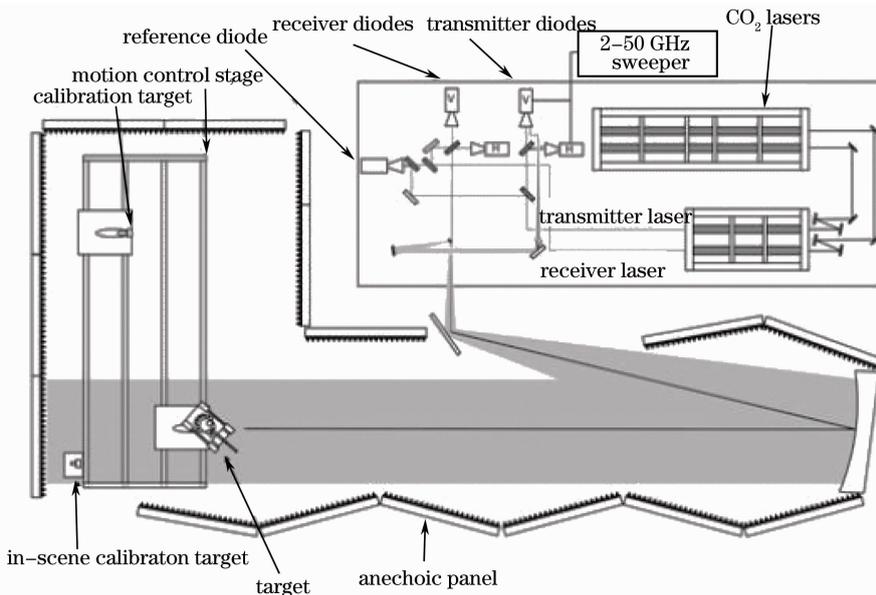


图 8 STL 基于 CO<sub>2</sub> 激光抽运太赫兹激光器的 RCS 实验装置

Fig. 8 RCS experimental facility with CO<sub>2</sub> laser-pumped terahertz laser in STL

1996 年美国 STL 利用信号合成器组成的紧缩场系统,进行了 0.16 THz 坦克 1:16 缩比模型的 RCS 测量实验,实验装置如图 10 所示。此测量装置是收发分置的相干探测系统,运动控制台上装有待测目标和校准目标。他们给出了对应 10 GHz 的理论计算和缩比模型测量结果,显示出很好的一致性<sup>[15]</sup>。1999 年,他们还进行了 0.524 THz 的缩比 1:16 坦克模型的 RCS 测量研究<sup>[16]</sup>,以圆盘和二面体作为校准目标,并对校准目标进行了 RCS 测量。2000 年他们又利用信号合成器,进行了 0.24 THz 的缩比 1:16 坦克模型的 RCS

研究<sup>[17]</sup>,以圆盘和二面体作为校准目标,并对校准目标进行了 RCS 测量。这些实验结果证明了此套具有自动校准和定位的 RCS 测量装置的准确性和可靠性。2009 年,他们进行了 7 种吸收材料的 0.16 THz 后向散射特性研究<sup>[18]</sup>,吸收材料实物照片如图 11 所示,材料尺寸 61 cm × 61 cm;图中 7 种材料从左至右分别是 FIRAM<sup>TM</sup>-160、FIRAM<sup>TM</sup>-500-red、FIRAM<sup>TM</sup>-500-black、RexMat、AEL、neoprene wetsuit 和 TK THz RAM。实验结果表明,楔形吸收材料 RCS 随楔形相对入射角周期性转动大幅度周期变化;而三个相对“均匀”的材料的 RCS 不依赖入射角,相对高的 RCS 是由体散射引起。另外,2010 年他们在 0.16 THz 研究了圆柱体的周期性粗糙和瑕疵对太赫兹散射的影响<sup>[14]</sup>。

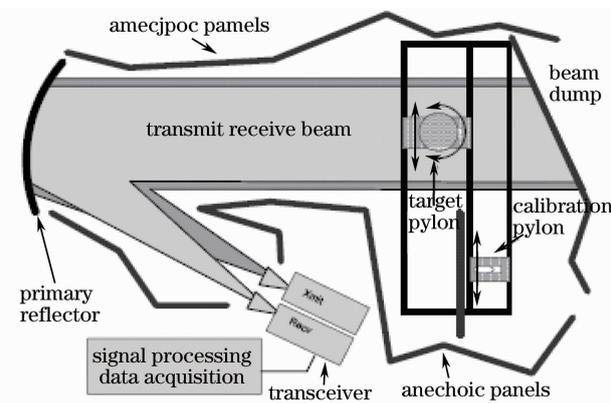


图 10 基于信号合成器的 RCS 实验装置

Fig. 10 RCS experimental facility with synthesizer in STL

我国尚未开展太赫兹 RCS 测量研究,主要利用太赫兹时域光谱系统和 CO<sub>2</sub> 激光抽运气体太赫兹激光器对氨基酸、毒品、纸张、聚乙烯、硅和锗等样本的反射谱、吸收谱或透射特性进行了测量研究<sup>[19~21]</sup>。

从国外近 20 年太赫兹 RCS 测量技术研究可以看出,美国是这方面的领军者,其主要研究单位是美国 STL;德国和丹麦仅利用飞秒激光器抽运晶体的宽带太赫兹辐射进行了测量研究,而且分别是在 2009 年和 2010 年。国外太赫兹 RCS 测量研究状况概要如表 1 所示。从太赫兹工作频率看,从 0.1~2 THz,且利用太赫兹时域谱系统工作频率范围最广;利用两支 CO<sub>2</sub> 激光抽运气体太赫兹激光器的工作频率只有 0.35、0.585、1.56 THz;利用信号合成器的工作频率只有 0.16、0.24、0.524 THz,且一般最多只能达到 0.75 THz。从缩比模型的缩比因子看,最大缩比因子是 2010 年丹麦的飞机模型,其缩比因子为 1:150。从待测目标尺寸看,利用信号合成器测量吸收材料的尺寸最大,其尺寸为 61 cm × 61 cm;一般目标尺寸在 1 mm~10 cm 范围。从装置小型化上看,利用信号合成器测量最为简单。

表 1 太赫兹 RCS 测量研究状况概要

Table 1 Summary of the terahertz RCS measurement research

Country year	THz source	Frequency /THz	Measurement objects
USA 2000	THz emitter pumped	0.2~1.4	3 mm-diameter aluminum-oxide cylinder
	by a femtosecond laser		6.36 mm-diameter aluminum-oxide sphere
Germany 2009	THz emitter pumped	0.3、0.5、1	15 mm×15 mm metal plate
	by a femtosecond laser		
Denmark 2010	THz emitter pumped by a femtosecond laser	0.1~2	5~10 cm airplane scale-model (1:150)

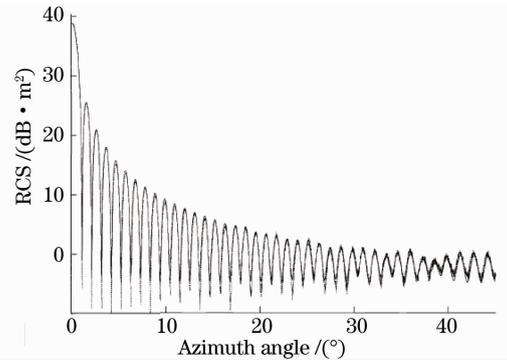


图 9 测量(虚线)和计算(实线)X-段倾角 0°时的 RCS

Fig. 9 measurement (dotted line) and computing (solid line) X-section of RCS at 0° angle

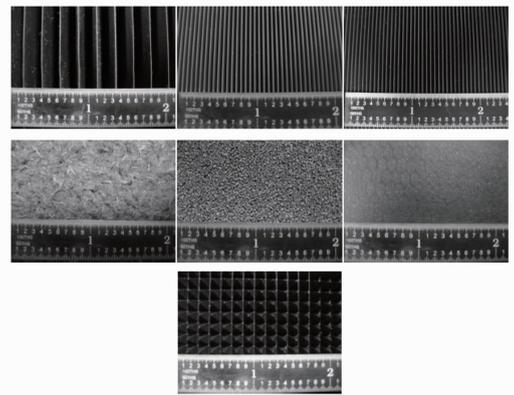


图 11 STL 实验用的吸收材料

Fig. 11 Absorbing materials used in STL

续表 1

Country year	THz source	Frequency /THz	Measurement objects
USA 1993~2010	Two CO <sub>2</sub> pumped gas lasers	0.35	Cube(1 inch)(1:35)
		0.585	Plate scale-model(1:16.7)
			Rectangle box(1:58.5)
			Military vehicles scale-model (1:16)
		1.56	Tank scale-model(1:16)
USA 1996~2010	Signal synthesizer	0.16	Seven absorbing materials(61 cm×61 cm)
			Tank scale-model(1:16)
		0.24	Flat disk, Dihedral
		0.524	Tank scale-model(1:16)

## 4 结束语

国外经过近 20 年的太赫兹 RCS 测量研究,已经形成了三类代表性测量系统,即利用飞秒激光器的太赫兹时域谱系统、利用 CO<sub>2</sub> 激光抽运气体太赫兹激光器的逆合成孔径雷达系统和利用信号合成器的相干探测系统。不仅测量了球、圆盘、二面体和圆柱体等标准体的 RCS,而且测量了飞机、坦克、军用车辆、矩形箱体等缩比模型的 RCS。不仅获得了部分目标的太赫兹波段的 RCS 测量值,而且也获得了部分微波波段全尺寸目标的 RCS 值。他们的实验结果证明缩比模型和全尺寸目标测量结果基本吻合,同时也证明测量结果和理论计算具有较好的一致性。可见,利用太赫兹源测量 RCS 具有很大的实用价值,有广阔的应用前景。现在太赫兹 RCS 测量技术还处于发展阶段,尚需在测量精度和测量装置小型化等方面进一步提高。

## 参 考 文 献

- Zhang Cunlin, Zhang Yan, Zhao Guozhong *et al.*. Terahertz Sensing and Imaging[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. 140~159  
张存林, 张 岩, 赵国忠 等. 太赫兹感测与成像[M]. 北京:国防工业出版社, 2008. 140~159
- Li Jin, Pi Yiming, Yang Xiaobo. Research on terahertz radar target detection algorithm based on the extraction of micro motion feature[J]. *J. Electronic Measurement and Instrument*, 2010, **24**(9): 803~807  
李 晋, 皮亦鸣, 杨晓波. 基于微动特征提取的太赫兹雷达目标检测算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, **24**(9): 803~807
- Yang Yang, Yao Jianquan, Song Yukun *et al.*. Radar scattering cross section in different wave band for spherical targets [J]. *Laser & Infrared*, 2011, **41**(5): 552~554  
杨 洋, 姚建铨, 宋玉坤 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): 552~554
- Yang Yang, Yao Jianquan, Tang Shixing *et al.*. Influence of the rough surface on radar target scattering cross section[J]. *Laser & Infrared*, 2011, **41**(7): 800~803  
杨 洋, 姚建铨, 唐世星 等. 粗糙表面对雷达目标散射截面的影响[J]. 激光与红外, 2011, **41**(7): 800~803
- Mao Shichun, Wu Zhensen, Xing Zanyang. Scattering by a homogeneous anisotropic elliptic cylinder: two-dimensional case [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, **38**(3): 529~533  
毛仕春, 吴振森, 邢赞扬. 二维各向异性椭圆柱的电磁散射[J]. 电子学报, 2010, **38**(3): 529~533
- Bao Xuezhi, Gao Wei. Method of laser radar cross section measuring with atmosphere condition changing [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(2): 414~417  
包学志, 高 卫. 大气条件变化时的激光雷达散射截面测量方法[J]. 光子学报, 2009, **38**(2): 414~417
- M. I. Skolnik. Radar Handbook[M]. Wang Jun, Lin Qiang, Mi Cizhong *et al.*. Transl. 2nd Edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. 415~447  
Merrill I. Skolnik. 雷达手册[M]. 王 军, 林 强, 米慈中等译. 第 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2003. 415~447
- R. W. McGowan, R. A. Cheville, D. R. Grischkowsky. Experimental study of the surface waves on a dielectric cylinder via terahertz impulse radar ranging[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory & Techn.*, 2000, **48**(3): 417~418
- C. Jansen, N. Krumbholz, R. Geisb *et al.*. Alignment and illumination issues in scaled THz RCS measurements[C]. 34th

International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2009

- 10 K. Iwaszczuk, H. Heiselberg, P. U. Jepsen. Terahertz radar cross section measurements[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(25): 26399~26408
- 11 M. J. Coulombe, T. Ferdinand, T. Horgan *et al.*. A 585 GHz compact range for scale model RCS measurements[C]. Bethesda: Proceedings of the Antenna Measurements and Techniques Association, 1993
- 12 T. M. Goyette, J. C. Dickinson, W. J. Gorveatt *et al.*. X-band ISAR imagery of scale-model tactical targets using a wide bandwidth 350GHz compact range[C]. *SPIE*, 2004, **5427**: 227~236
- 13 T. M. Goyette, J. C. Dickinson, J. Waldman *et al.*. A 1.56 THz compact radar range for W-band imagery of scale-model tactical targets[C]. *SPIE*, 2000, **4053**: 615~622
- 14 A. Jagannathan, A. J. Gatesman, T. Horgan *et al.*. Effect of periodic roughness and surface defects on the terahertz scattering behavior of cylindrical objects[C]. *SPIE*, **7671**: 76710E
- 15 M. J. Coulombe, T. Horgan, J. Waldman *et al.*. A 160 GHz polarimetric compact range for scale model RCS measurements[C]. Seattle: Proceedings of the Antenna Measurements and Techniques Association, 1996
- 16 M. J. Coulombe, T. Horgan, J. Waldman *et al.*. A 524 GHz polarimetric compact range for scale model RCS measurements[C]. Seattle: Proceedings of the Antenna Measurements and Techniques Association, 1999
- 17 G. B. DeMartinis, M. J. Coulombe, T. M. Horgan *et al.*. A 240 GHz polarimetric compact range for scale model RCS measurements[C]. Atlanta: Proceedings of the Antenna Measurements and Techniques Association, 2010
- 18 C. Wu, A. J. Gatesman, L. DeRoock *et al.*. Terahertz backscattering behavior of various absorbing materials[C]. *SPIE*, 2009, **7311**: 73110M
- 19 Zhu Dechong, Zhang Liangliang, Zhao Yaqin *et al.*. Terahertz broadband spectroscopic investigations of amino acid[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(s1): s111008  
祝德充, 张亮亮, 赵亚芹 等. 氨基酸的超宽带太赫兹光谱[J]. *中国激光*, 2011, **38**(s1): s111008
- 20 Zhao Shusen, Chen Sijia, Shen Jingling. Identification of terahertz absorption spectra of illicit drugs using support vector machines[J]. *Chinese J. Laser*, 2009, **36**(3): 752~757  
赵树森, 陈思嘉, 沈京玲. 用支持向量机识别毒品的太赫兹吸收光谱[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 752~757
- 21 S. H. Ding, Q. Li, R. Yao *et al.*. Absorption coefficient measurement of high-resistivity germanium at 2.52THz by Brewster's angle method[J]. *Appl. Phys. B*, 2010, **99**(4): 733~739