文章编号：1001-9014(2021)03-0341-06　　DOI：10. 11972/j. issn. 1001-9014. 2021. 03. 010

大动态范围太赫兹频段雷达散射截面测量

乔鸿展[1,2]，钟　凯[1,2*]，史　杰[1]，刘　阳[1,2]，刘科飞[1,2]，徐德刚[1,2]，姚建铨[1,2]

（1. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院 激光与光电子研究所，天津 300072；
2. 光电信息技术教育部重点实验室，天津大学，天津 300072）

摘要：针对目前太赫兹频段雷达散射截面(RCS)测量动态范围较小的问题，提出了一种结构分段定标结合数据分段处理的大动态范围RCS获取方法。基于相对定标理论分析了单一定标测量方式对RCS测量范围与测量精度的限制，并通过对光滑金属球与圆柱的实验测量进行了验证。通过光滑金属平板的RCS测量讨论了衰减元件的引入对系统测量精度与测量范围的影响。在此基础上，利用结构分段定标结合数据分段处理对弹头模型的RCS进行了测量，成功获得了弹头模型的主要散射特征，实现了目前已知最高的63 dB动态范围，测量结果与仿真计算结果一致。

关　键　词：雷达散射截面；太赫兹；大动态范围
中图分类号：TN95　　**文献标识码**：A

Large-dynamic-range radar-cross-section measurement in the terahertz band

QIAO Hong-Zhan[1,2]，　ZHONG Kai[1,2*]，　SHI Jie[1]，　LIU Yang[1,2]，　LIU Ke-Fei[1,2]，　XU De-Gang[1,2]，
YAO Jian-Quan[1,2]

（1. Institute of Laser and Optoelectronics，School of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering，
Tianjin University，Tianjin 300072，China；
2. Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology（Ministry of Education），Tianjin University，
Tianjin 300072，China）

Abstract：A method to overcome the problem of limited dynamic range in current radar-cross-section（RCS）measuring systems in the terahertz band was proposed，by adopting structural subsection calibration and data subsection processing. The limitation of onefold calibration on the RCS measurement range and accuracy was analyzed based on the relative calibration theory，and verified by experimental measurement of a smooth metal sphere and a smooth metal cylinder. A smooth metal plate was also used to discuss the effect of using signal attenuators on the system measuring range and accuracy. Finally，the measurement of the RCS of a warhead model was realized by structural subsection calibration combined with data subsection processing，and the main scattering characteristics were successfully recognized. The measuring dynamic range reached 63 dB，which should be the highest as far as we know. The measured results accorded well with the simulation results.

Key words：radar cross section，terahertz，large dynamic range

引言

太赫兹频段(0. 1~10 THz)介于微波频段和红外频段之间，处于电子学向光子学的过渡区。由于其特殊的频谱位置，太赫兹波具有大带宽、穿透性强、能量低、高分辨率等特点，在宽带通信、公共安全、生物医学、军事国防等领域具有广泛的应用前景[1-3]。太赫兹雷达与激光雷达相比具有更宽的波束和探测视场范围，与微波雷达相比具有更好的空

收稿日期：2020- 07- 08，**修回日期**：2020- 11- 08　　**Received date**：2020- 07- 08，**Revised date**：2020- 11- 08
基金项目：国家自然科学基金(61675146)
Foundation items：Supported by the National Natural Science Foundation of China (61675146)；
作者简介(Biography)：乔鸿展(1994—)，男，山东德州人，博士研究生，主要研究领域为太赫兹技术. E-mail：qiaohongzhan@hotmail. com
*通讯作者(Corresponding author)：E-mail：zhongkai@tju. edu. cn

间分辨能力和抗干扰能力，是目前国内外太赫兹技术发展的重点方向之一[4-6]。而雷达散射截面(RCS)作为表征目标对雷达信号波散射能力的重要参数，对雷达系统设计、目标跟踪识别和隐身设计等具有重要意义，是太赫兹雷达技术研究的重要基础内容[7-8]。

近年来，随着太赫兹雷达相关研究的发展，太赫兹频段目标RCS的测量技术受到国内外研究机构的极大关注。1993年美国亚毫米波技术实验室(STL)最早建立了基于两台CO_2激光器抽运气体太赫兹源的紧缩场相干RCS测量系统[9]，2001年完成了对飞机、坦克等目标模型在0.35 THz和1.56 THz两个频点的RCS测量和成像实验[10]。2009年，德国布伦瑞克太赫兹通信实验室Jansen等利用时域光谱(TDS)系统对宽度为15 cm的正方形金属板在0.3 THz、0.5 THz和1 THz三个频点的RCS进行了测量[11]。2010年，丹麦技术大学Iwaszczuk等利用基于TDS系统对1/150的F-16飞机缩比模型进行了太赫兹频段RCS测量[12]，得到了具有较高分辨率的结果。2013年，天津大学梁达川等搭建了国内首台宽频时域太赫兹RCS测量系统，对飞机、坦克等缩比模型的RCS分布进行了测量[13]，2014年对模型的轮廓外形成像进行了研究[14]。2014年天津大学的杨洋等对太赫兹频段粗糙金属球的散射特性进行了测量与分析，并对RCS测量中定标体的确定进行了讨论[15]。2016年，华中科技大学聂雪莹等采用TDS系统与连续太赫兹源测量系统分别对金属平板的RCS进行了测量[16]，哈尔滨工业大学樊长坤、李琦等人对不同粗糙度铝板在2.52 THz频点的后向散射特性进行了实验探索[17]。2018年天津大学王茂榕、史杰等基于CO_2激光抽运的太赫兹源搭建了高频段太赫兹RCS测量系统，首次开展了3.11 THz频点处不同材料、涂覆层金属平板及圆锥体RCS的测量研究[18]，并在理论及实验上对太赫兹频段粗糙金属平板的散射特性进行了讨论[19]。总体来看，目前国内具备了一定的太赫兹频段目标RCS测量能力，且测量结果与理论计算基本一致性，能够为太赫兹雷达技术的发展提供一定的支撑作用。然而，由于目前太赫兹频段的辐射源、探测器等关键器件发展水平有限，太赫兹频段RCS测量系统存在的普遍问题是动态范围非常有限(30~40 dB)，测量范围及测量能力较为有限，容易丢失目标细节信息，影响测量结果的精度与可靠性。

太赫兹频段RCS测量系统的动态范围主要受探测器的动态范围限制，即探测器对光信号进行不失真探测的范围。当探测器接收的信号强度超过上限时会因饱和失真而无法得到准确的测量值，而采用较小的接收天线提高大信号测量能力又会导致更多的弱信号湮没在噪声中，失去部分测量细节。提高测量系统的动态范围，对改善RCS测量精度以及对复杂目标进行全面准确测量具有非常重要的意义。为解决上述问题，本文提出了一种结构分段标定结合数据分段处理的RCS获取方法，基于CO_2激光抽运的太赫兹激光器搭建了室内近场太赫兹RCS测量系统，以光滑金属球与光滑金属平板作为定标体，在2.52 THz频点对弹头模型进行了RCS测量，实现了目前已报道结果中最高的63dB动态范围，远远突破了探测器本身的动态范围限制，对复杂目标太赫兹频段的RCS测量具有重要意义。

1 相对定标理论

目标的RCS一般定义为单位立体角内目标面向接收方向散射功率与入射平面波功率密度比值的4π倍[7]，即：

$$\sigma = 4\pi \cdot \frac{P_g}{P_i} \quad , \quad (1)$$

其中P_g为接收天线所张立体角内的散射功率，P_i为目标体单位面积的照射功率密度。实际测量过程中采用相对定标法，将待测目标和已知RCS理论解析值的定标体先后置于测量区域，保证其他条件的一致性分别测量得到接收功率P_r和P_0，则有：

$$\sigma = \frac{P_r}{P_0}\sigma_0 \quad , \quad (2)$$

式(2)中P_r为目标体散射信号功率，P_0为定标体散射信号功率，σ_0为已知定标体RCS理论值，以dBsm为单位，表示为：

$$\mathrm{RCS} = 10\log\left(\frac{P_r}{P_0}\sigma_0\right) = 10\left(\log\left(\frac{P_r}{P_0}\right) + \log(\sigma_0)\right). \quad (3)$$

根据式(3)，实际测量中P_r/P_0值的范围受限于系统可探测的信号强度范围，一般在1mV量级到10V量级，不改变探测器增益时P_r/P_0在10^4以内，因此在σ_0一定的前提下，RCS测量系统的动态范围一般小于40 dB。此外，对于复杂结构目标，某些强散射位置的散射信号P_r会超出系统可测极限而导致探测器饱和失真，而降低探测器增益或加入衰减元件又可能会使弱散射特征湮没在噪声中，限制了RCS的测量范围。根据常用简单定标体的RCS理论

计算公式,尺寸相近的平板、圆柱和球的σ_0差距很大[7]。对于同一复杂目标,根据散射信号强弱采用不同定标体进行分段定标,并通过控制增益或采用衰减元件多次测量分段处理,既可以提高测量系统的测量准确度,又能实现大的动态范围。

2　测量系统与样品

实验搭建的RCS测量系统如图1所示。太赫兹源为英国爱丁堡仪器公司生产的太赫兹激光器FIRL-100。该激光器利用高功率连续的CO_2激光9P36谱线泵浦CH_3OH气体产生2.52 THz的太赫兹波,最高输出功率为100 mW,实验中实际使用的输出功率不超过25 mW。激光器输出的太赫兹波束经过斩波器调制成为脉冲形式以便于探测器进行数据采集。为提高测量准确性,输出波束经过间距为25 μm金属线栅分束器(BS)分出一小部分作为参考波束,其余透过分束器后作为探测波束。参考波束由参考探测器(Golay Cell)同步测量功率,来补偿测量过程中激光器输出功率漂移造成的测量误差。探测信号经过镀金膜反射镜后由共焦抛物面镜组P1(焦距12.7 mm)和P2(焦距254 mm)进行扩束,扩束后辐射场为直径大于80 mm的近均匀分布圆形光斑。测量样品通过支架固定在精密电控转台上以实现样品360°全角度范围的散射信号测量。样品平台采用三轴独立调节底座,结合水平仪以精确固定上层转台的水平方位,避免由于样品俯仰角变化引入的测量误差。为减少背景噪声的影响,转台周围包覆低密度泡沫作为吸波材料,目标样品支架为白色聚乙烯材质。目标散射信号经过抛物面镜P3(焦距125 mm)收集后由信号探测器(液氦制冷的4.2 K Bolometer)进行采集。环境背景噪声的测量值约为5 mV,与探测器最灵敏工作模式(最高增益倍数1 000)下的可测最小信号相当,探测器的饱和输出电压约为13 V,因此整体动态范围约为35 dB,且环境底噪较低,不会对测量结果产生明显影响。整个测量过程由Labview程序实现转台的运动控制并自动记录测量结果。

实验中所涉及的目标样品如图2所示,包括不锈钢材质的光滑金属球(直径5 cm)、铝合金材质的光滑金属平板(5 cm × 5 cm)、圆柱(高5 cm,底面直径2 cm)及弹头模型(底面直径5 cm)。光滑金属球、圆柱及平板都可以作为RCS测量的定标体,尤其是球和圆柱在转动时结构不变,能够保证较高的定标测量精度。光滑金属平板由于其主散射面的

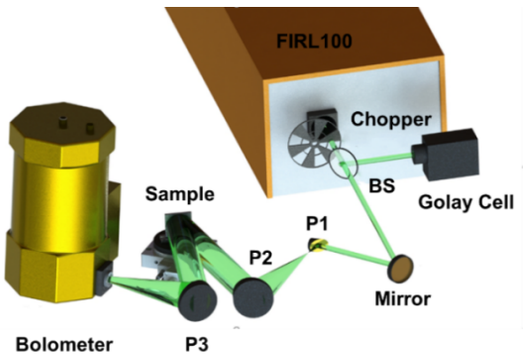


图1　太赫兹频段目标RCS测量系统,注:BS为分束器,Mirror为镀金膜平面反射镜,P1、P2和P3为离轴抛物面镜

Fig. 1　Terahertz RCS measurement system, note: BS is a beam splitter; M is a gold-coated plane reflector; P1, P2 and P3 are off-axis parabolic mirrors

信号很强,如果不进行衰减容易使高灵敏度探测器饱和。弹头模型结构相对复杂,其曲面散射以球面散射特征为主,信号较弱,底面以平面散射特征为主,信号较强。若应用单一标定单次测量,由于测量系统的动态范围不足,难以同时获得底面和侧面的准确散射信号,不能满足整体RCS的测量要求。

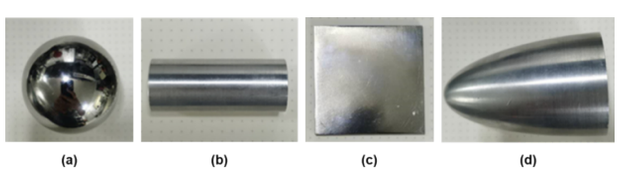
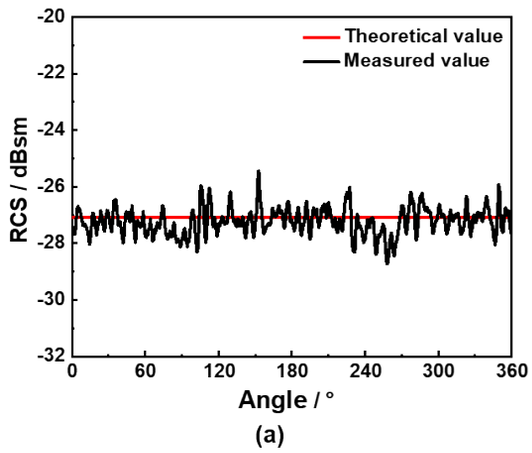


图2　测量样品图(a)光滑金属球,(b)光滑金属圆柱,(c)光滑金属平板,(d)光滑金属弹头模型

Fig. 2　Sample pictures (a) Smooth metal ball, (b) Smooth metal cylinder, (c) Smooth metal plate, (d) Smooth metal warhead model

3　实验测量结果与分析

为验证RCS测量系统的可靠性,设置探测器工作于最灵敏的模式,用直径5 cm的光滑金属球作为定标体对其自身进行测量,信噪比超过20 dB,换算为RCS的结果如图3(a)所示。与解析解(-27.1 dBsm)相比,球旋转一周的测量误差在±1.5 dB以内;为了测量圆柱体侧面的RCS,改变探测器的工作模式以减小增益,测量结果如图3(b)所示,与解析解(1.4 dBsm)相比测量误差在±1 dB以内,测量结果具有较高的精度和可靠性。光滑金属球和圆柱的RCS值相差28.5 dBsm,根据式(3),若对同一目标通过改变测量系统参数,采用两种定标方式进行RCS测量,有望显著扩展测量系统的动态范围。



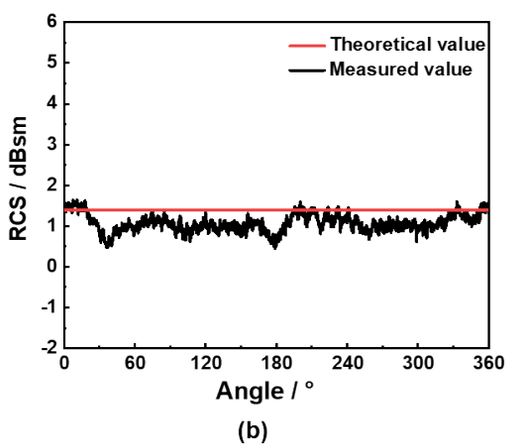
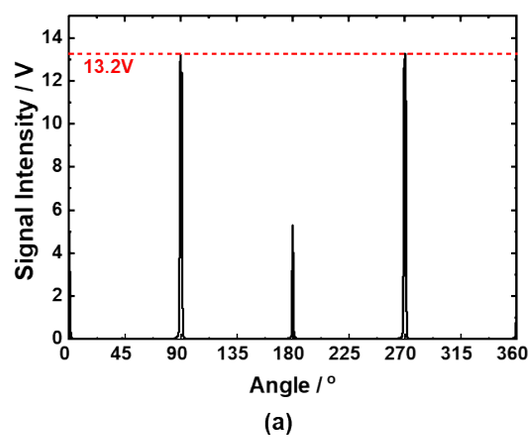


图3 光滑金属球和圆柱定标体的RCS测量结果 (a) 光滑金属体, (b) 光滑金属圆柱

Fig. 3 RCS measurement results of the smooth metal sphere and cylinder calibrators (a) Smooth metal sphere, (b) Smooth metal cylinder

光滑金属平板与球和圆柱不同,当旋转平板的角度时,散射信号的变化非常大,尤其是当主散射平面及侧面的角度满足反射定律时,发生镜面反射,极易使高灵敏度探测器饱和。图4(a)所示为在探测器最低增益模式下平板360°旋转所获得的测量信号,90°和270°的两个峰值分别对应前后两个主散射平面,0°和180°的两个峰值对应厚度方向上的两个侧面。显然,对应主散射峰的信号已达到饱和幅值13.2 V,无法反应该处的准确信号强度。为解决这一问题,对于散射信号强度高于信号测量极限13.2 V的情况,在探测器前加入太赫兹衰减片(透过率为1%),测量结果如图4(b)所示。考虑衰减倍数,平板的主散射信号峰值可达400 V左右,经定标后的RCS值与理论计算值40 dBsm相比误差小于3 dBsm;未加入衰减片测得的主散射信号峰值对应的RCS值仅为25 dBsm,显然是错误的。然而,对于面积较小的平板侧面,不加衰减片直接测量的散射信号良好,而加入衰减片后由于测量值与背景噪声接近,这将影响其测量精度。因此,通过加入衰减片能够显著提高测量系统的可测范围,但对弱散射信号的精确测量不利,对于不同方位散射特征变化明显的复杂目标,RCS测量时可以在有无衰减元件两种情况下分别测量强弱散射信号,然后对数据进行分段处理。

图2(d)所示的弹头模型具有两种散射特征,曲面结构散射特征与球体相近,而底面结构散射特征



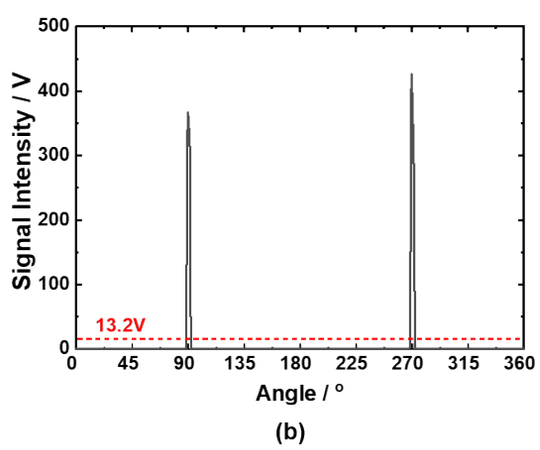


图4 光滑金属平板散射信号测量结果 (a) 直接测量, (b) 加衰减片测量(测量信号除以衰减系数换算后的数据)

Fig. 4 Measurement results of scattering signal of aluminum alloy plate (a) Direct measurement, (b) Measurement with an attenuator (measured data divided by the attenuation coefficient)

与平板散射特征相似,理论计算结果显示其较为明显的散射峰位于其底面和侧面,RCS 值分别为 35.2 dBsm 和−15.4 dBsm,差距超过 50 dBsm,远远超出探测器本身的动态范围。为了实现对弹头模型 RCS 的全面准确测量,我们提出了结构分段标定结合数据分段处理的方法。第一步,以球作为定标体,在保证太赫兹源稳定工作的前提下,选择合适的输出功率及探测器高灵敏工作模式,对弹头样品的散射信号进行测量。此时,对应弹头底面(180°)的主峰信号在有无衰减的条件下均为饱和失真状态,但弱散射特征部分在未加衰减片的情况下测量结果较好,如图 5(a)所示,因此以未加衰减片的散射信号作为弱信号部分的有效数据,通过球定标可获得相应 RCS 值。第二步,为实现弹头底面主峰信号的有效测量,改变输出功率及探测器工作模式,以平板为定标体来对主峰强散射信号进行单独定标。此时,不加衰减片时信号仍然饱和,加入衰减片可获得主峰散射信号值,但弱散射信号部分由于系统信噪比限制无法准确测量,有效数据仅为主散射峰的散射信号,如图 5(b)所示。

根据图 5(a)及 5(b)中按结构分段测得的散射信号,分别利用球和平板进行分段定标和数据处理,组合后得到弹头模型的完整 RCS 测量结果,如图 5(c)所示。结果显示,弹头模型底面的峰值 RCS 为 33.3 dBsm,侧面散射峰值的 RCS 为−16.6 dBsm,最小值约为−31 dBsm,整体的信噪比超过 63 dB。与电子科技大学采用表面积分方程法结合多层快速多极子算法的目标雷达散射截面数值计算结果相比[20],底面及侧面峰值误差均优于 3 dBsm。由于数值计算建模与实际加工样品无法保证完全一致,导致侧面散射峰的形状存在稍有差别,但在动态范围内的测量结果与计算结果基本一致,这也证明了根据结构散射特征分段定标、散射数据分别处理的方法,对于提升 RCS 测量系统的性能是非常有效的。动态范围达到 63 dB 的测量系统也基本能够满足多数复杂目标的 RCS 测量要求。

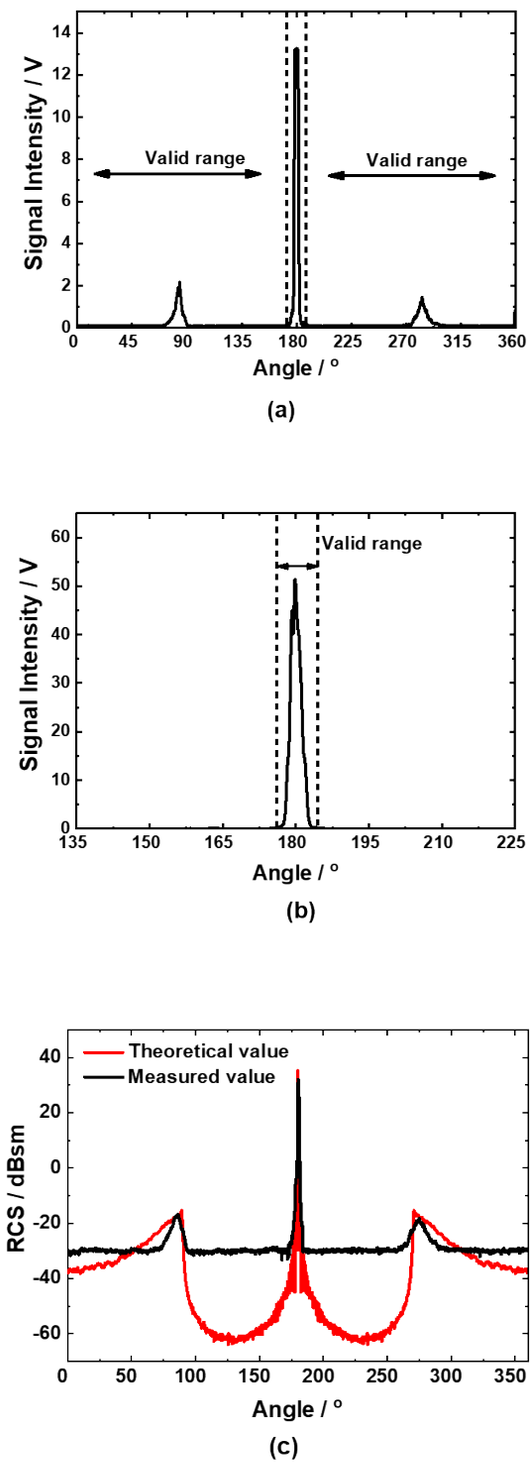


图 5　弹头散射特性测量结果 (a) 球体定标散射数据, (b) 平板定标测量数据, (c) 分段处理后组合的弹头 RCS 结果

Fig. 5　Measurement of warhead scattering characteristics (a) Scattering signal with sphere calibration, (b) Scattering signal with plate calibration, (c) RCS results of the warhead by combining subsection processed data

4　结语

在器件发展水平相对较低的太赫兹频段,RCS 测量系统的动态范围不足是目前面临的一个主要问题。本文根据 RCS 的相对定标理论及实际探测器的输出信号范围分析了提升动态范围的可行途径,提出了一种结构分段定标结合数据分段处理的方法。基于太赫兹激光器和 Bolometer 探测器搭建

了2.52 THz紧缩场RCS测量系统，对较为复杂的弹头模型RCS测量中实现了高达63 dB的动态范围，远远突破了探测器本身的可测范围，成功对目标底面及侧面的RCS峰值进行了测量，测量值与理论计算结果相符，为复杂目标散射特性的准确测量提供了一种可行的方法。

References

[1] YAO Jian-Quan, ZHONG Kai, XU De-Gang. Study and outlook of terahertz space applications [J]. *Space Electronic Technology*(姚建铨, 钟凯, 徐德刚. 太赫兹空间应用研究与展望. **空间电子技术**), 2013, **10**(2): 1-16.

[2] XIE Qi, YANG Hong-Ru, LI Hong-Guang, *et al*. Explosive identification based on terahertz time domain spectral system [J]. *Optics and Precision Engineering*(解琪, 杨鸿儒, 李宏光, 等. 基于太赫兹时域光谱系统的爆炸物识别. **光学精密工程**), 2016, **24**(10): 2392-2399.

[3] PAN Wu, ZENG Wei, ZHANG Jun, *et al*. Design of multilayer stacked terahertz communication lens antenna [J]. *Optics and Precision Engineering*(潘武, 曾威, 张俊, 等. 堆叠型太赫兹通信透镜天线设计. **光学精密工程**), 2017, **25**(1): 65-72.

[4] WANG Hong-Qiang, DENG Bin, QIN Yu-Liang. Review of Terahertz Radar Technology [J]. *Journal of Radars*(王宏强,邓彬,秦玉亮. 太赫兹雷达技术. **雷达学报**), 2018, **7**(1): 1-21.

[5] LIANG Mei-Yan, DENG Chao, ZHANG Cun-Lin. THz radar imaging technology [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*(梁美彦, 邓朝, 张存林. 太赫兹雷达成像技术. **太赫兹科学与电子信息学报**), 2013, **11**(2): 189-198.

[6] ZHENG Xin, LIU Chao. Recent Development of THz Technology and Its Application in Radar and Communication System(I) [J]. *Journal of Microwaves*(郑新, 刘超. 太赫兹技术的发展及在雷达和通讯系统中的应用(I). **微波学报**), 2010, **26**(6): 1-6.

[7] HUANG Pei-Kang, YIN Hong-Cheng, XU Xiao-Jian. Radar Target Characteristic [M]. Beijing: Electronic Industry Press(黄培康, 殷红成, 许小剑. **雷达目标特性**). 北京: 电子工业出版社), 2005.

[8] LI Qi, XUE Kai, LI Hun-yu, *et al*. Advances in Research of Terahertz Radar Cross Section Measurements [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*(李琦, 薛凯, 李慧宇, 等. 太赫兹雷达散射截面测量研究进展. **激光与光电子学进展**), 2012, **49**(6): 60001.

[9] Coulombe M J, Ferdinand T, Horgan T, *et al*. A 585 GHz compact range for scale-model RCS measurements [R]. University of Massachusetts Lowell Submillimeter-Wave Technology Laboratory, 1993.

[10] Goyette T M, Dickinson J C, Waldman J. Fully polarimetric W-band ISAR imagery of scale-model tactical targets using a 1.56-THz compact range. Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery VIII [C]. Orlando, 2001.

[11] Jansen C, Krumbholz N, Geise R, *et al*. Alignment and illumination issues in scaled THz RCS measurements. Proceedings of the 2009 34th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2009 [C]. Busan, 2009.

[12] Iwaszczuk K, Heiselberg H, Jepsen P U. Terahertz radar cross section measurements [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(25): 26399-26408.

[13] LIANG Da-Chuan, GU Jian-Qiang, HAN Jia-Guang, *et al*. Terahertz Time-domain Radar System [J]. *Space Electronic technology*(梁达川, 谷建强, 韩家广, 等. 宽频太赫兹时域雷达系统. **空间电子技术**), 2013, (4): 99-103.

[14] LIANG Da-Chuan, WEI Ming-Gui, GU Jian-Qiang, *et al*. Broad-band time domain terahertz radar cross-section research in scale models [J]. *Acta Physica Sinica*(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. **物理学报**), 2014, **63**(21): 214102.

[15] YANG Yang, YAO Jian-Quan, SONG Yu-Kun, *et al*. Radar scattering cross section in different wave band for spherical targets [J]. *Laser and Infrared*(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. **激光与红外**), 2011, **41**(5): 552-556.

[16] NIE Xue-Ying, XIANG Fei-Di, HUANG Xin, *et al*. Measurement of terahertz radar cross-section of metal plate [J]. *Laser Technology*(聂雪莹, 项飞荻, 黄欣, 等. 金属平板的太赫兹雷达散射截面测量. **激光技术**), 2016, **40**(5): 676-681.

[17] FAN Chang-Kun, LI Qi, ZHOU Yi, *et al*. Measurement investigation of 2.52 terahertz back scattering in aluminium plates with four kinds of roughness [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*(樊长坤, 李琦, 周毅, 等. 四种粗糙度铝板的2.52 THz后向散射测量研究. **激光与光电子学进展**), 2016, (11): 155-160.

[18] WANG Mao-Rong, ZHONG Kai, LIU Chu, *et al*. Radar cross section measurement at 3.11 THz based on terahertz gas lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*(王茂榕, 钟凯, 刘楚, 等. 3.11 THz 标准体雷达散射截面测量. **红外与激光工程**), 2018, **47**(2): 0225001.

[19] SHI Jie, ZHONG Kai, LIU Chu, *et al*. Scattering properties of rough metal surface in terahertz region [J]. *Infrared and Laser Engineering*(史杰, 钟凯, 刘楚, 等. 太赫兹频段金属粗糙表面散射特性. **红外与激光工程**), 2018, **47**(12): 1217004.

[20] ZHANG Xu-Tao, QUE Xiao-Feng, CAI He, *et al*. Simulations and time-domain spectroscopy measurements for terahertz radar-cross section [J]. *Acta Physica Sinica*(张旭涛, 阙肖峰, 蔡禾, 等. 太赫兹雷达散射截面的仿真与时域光谱测量. **物理学报**), 2019, **68**(16): 16870.