

3.11THz 标准体雷达散射截面测量

王茂榕^{1,2,3}, 钟凯^{1,2}, 刘楚^{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;
3. 青岛科技大学数理学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 针对太赫兹近场散射特性测量特点, 基于CO₂激光抽运的太赫兹激光器和双层独立转动平台搭建了一套高频段太赫兹雷达散射截面(RCS)测量系统。利用不锈钢光滑金属球体作为标准定标体验证了系统的可靠性, 测量结果与理论值误差小于 3 dBsm, 系统的信噪比优于 24 dB。首次利用该系统开展了 3.11 THz 频点处不同材料及涂覆层圆形金属平板及不同底面直径圆锥体 RCS 的测量。通过比较分析发现了表面阳极氧化和喷漆处理的航空铝及 P304 不锈钢与纯航空铝平板的 RCS 区别, 以及不同底面直径的圆锥体 RCS 差异, 为太赫兹频段复杂目标体 RCS 的研究奠定基础。

关键词: 太赫兹(THz)波; 雷达散射截面(RCS); 标准体; 定标

中图分类号: TN958.94 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0225001

Radar cross section measurement of standard targets at 3.11 THz

Wang Maorong^{1,2,3}, Zhong Kai^{1,2}, Liu Chu^{1,2}, Xu Degang^{1,2}, Yao Jianquan^{1,2}

- (1. Institute of Laser and Optoelectronics, College 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;
3. School of Mathematics and Physics, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266100, China)

Abstract: Considering the terahertz near-field scattering characteristics, a high-frequency terahertz radar cross section (RCS) measurement system was presented based on a CO₂ laser pumped terahertz laser and an independent double-deck rotation platform. The reliability of the system was verified by utilizing stainless steel smooth spheres as the standard calibration targets. The error between measurement result and the theoretical value was less than 3 dBsm and the signal-to-noise ratio is better than 24 dB. For the first time, RCS measurement of metal plates was performed with different materials and coatings, and metal cones with different bottom diameter, at a high frequency of 3.11 THz. The RCS difference of pure, anodized, painted aviation aluminum and P304 stainless steel plates, was demonstrated. The RCS of cones with different bottom diameters made of pure aviation aluminum plate was also compared. This work can lay the foundation for further study of the complex target RCS research in the terahertz band.

Key words: terahertz (THz) wave; radar cross section(RCS); standard target; calibration

收稿日期:2017-08-14; 修订日期:2017-10-12

基金项目:国家自然科学基金(61675146,61471257);一院高校联合创新基金

作者简介:王茂榕(1986-),男,博士生,主要从事太赫兹雷达散射特性方面的研究。Email:mrwang@tju.edu.cn

导师简介:钟凯(1984-),男,副教授,博士生导师,博士,主要从事激光及太赫兹技术方面的研究。Email:zhongkai1984@gmail.com

0 引言

太赫兹(Terahertz 或 THz, 0.1~10 THz)波频段在电磁波谱上介于微波与红外之间,在宽带通信、公共安全、生物医学、军事国防等诸多领域具有重要应用价值。太赫兹相关技术,包括太赫兹源、探测、传输及其应用,近年来一直是光电领域的研究热点^[1-6]。太赫兹雷达作为太赫兹应用的一个重要方向,具备大带宽和极高分辨率等优点,能够获取被测目标的细微结构、运动特征以及材料属性等,具有重要的军事应用前景。而雷达散射截面(RCS)作为表征雷达目标体对入射电磁波散射能力的一个物理量,是雷达系统设计及装备发展的基础。在传统微波波段,国内外科研机构已经对各类目标体进行了大量的静态和动态 RCS 特性的理论分析和实际测量^[7]。

目前,太赫兹雷达领域的典型研究成果主要集中在欧美发达国家的科研机构。2009年,德国布伦瑞克太赫兹通信实验室 C. Jansen 等人在基于光纤耦合太赫兹收发器搭建了 RCS 时域测量系统,并通过金属球与平板的测量结果与理论数据进行对比验证了该系统的可靠性^[8]。2012年他们基于改进的综合光纤耦合天线与双圆测角器系统,完成了不同双站角 RCS 测量,获得了 1:250 的旋风 200 战机与 F-117 战机缩比模型 RCS 随频率和角度变化曲线,对比分析了旋风 200 在挂弹前后 RCS 变化以及 F-117 垂直尾翼展开后的 RCS 变化^[9]。2010年,丹麦技术大学的 K. Iwaszczuk 等人基于飞秒激光器建立了一套太赫兹时域脉冲测量系统,获得了 1:150 缩比 F-16 飞机不同姿态角下的 RCS 结果^[10]。美国 STL 实验室自 20 世纪 80 年代以来,先后基于微波源及光学源分别研制了多种单频太赫兹抛物面紧缩场测量系统,并对军用卡车、坦克等目标的缩比模型进行了 RCS 测量和相关成像研究^[11]。2006年,芬兰赫尔辛基科技大学基于微波倍频源建立了 0.31 THz 全息图形太赫兹紧缩场测量系统,通过对金属球和平板的实验,证实了相位全息图型 RCS 紧缩场测量的可行性,并对导弹模型的测量结果与计算结果进行了对比验证^[12]。从这些研究工作可以看出,国外太赫兹频段雷达目标散射截面测量系统已经能够实现 2.4 THz 以下实验室内的测量,但是更高频段的测量系统以及不同测量方法的比对验证还未见报道。

国内方面,2007年东南大学崔铁军等陆续开展了对金属导体板的 RCS 仿真工作,得到了相应的理论仿真结果^[13],而后复旦大学和哈尔滨工业大学也分别计算了随机粗糙电大尺寸目标体的散射特性以及在理论上分析了高斯脉冲对球体柱体 RCS 的影响^[14-15]。北京航空航天大学在 2015 年由江月松等人开展了不同涂覆层和不同频段圆柱体的散射截面仿真工作,在理论上得到了不同涂覆厚度以及不同频点处的太赫兹 RCS^[16]。在实验方面,从 2011 年开始天津大学杨洋等人陆续开展了太赫兹频段 RCS 相关测量工作,分析了雷达定标理论以及初步测量了典型目标体的散射特性^[17]。2013 年天津大学和国防科技大学利用光纤太赫兹时域光谱系统分别开展了圆柱及坦克目标 RCS 的测量研究,获得了相应目标体在低频段太赫兹 RCS^[18-19]。2016 年,哈尔滨工业大学樊长坤、李琦等人对 2.52 THz 频点开展了不同粗糙度铝板的后向散射实验探索^[20]。总体看来国内的测量技术研究起步较晚,整体水平相比国外还有较大差距,理论仿真较多而实验测量技术研究较少,测量频段也主要集中在低频段,尚未有 3 THz 以上频段的关于 RCS 测量结果的报道。

文中基于 CO₂ 抽运的太赫兹激光器搭建了一套室内近场太赫兹 RCS 测量系统。基于该系统开展了 3.11 THz 单频点 RCS 的测量技术研究,用不同直径的不锈钢光滑金属球作为标准体对系统进行定标并验证了系统的可靠性。基于该系统分别测量了不同涂覆层金属平板和圆锥体的 RCS 曲线,分析了不同金属及不同涂覆层圆形平板在 3.11 THz 处 RCS 的变化情况以及对比了不同底面直径圆锥体 RCS 的变化趋势,验证了该系统用于测量高频段太赫兹 RCS 的准确性,该研究内容为复杂目标体(如飞行器,弹头等)在太赫兹频段 RCS 测量工作提供了参考。

1 系统组成

整体实验系统组成如图 1 所示。太赫兹源为爱丁堡仪器公司(Edinburgh Instruments Ltd)生产的型号为 FIRL-100 的连续输出太赫兹激光器,利用高功率 CO₂ 激光器 9R10 分子线泵浦纯度为 99.9% 的 CH₃OH 气体产生 3.11 THz,稳定输出功率为 16 mW。输出的太赫兹波首先经斩波器变为准连续输出以便于数据采集,然后通过线间距为 25 μm 的金属线栅

将准连续太赫兹波分束为参考光与信号光。利用 Golay Cell 探测器采集参考光信号,从而实现在信号采集过程中实时可视化检测激光器功率的稳定性,同时参考信号可用于消除激光器输出功率不稳定造成的测量误差。

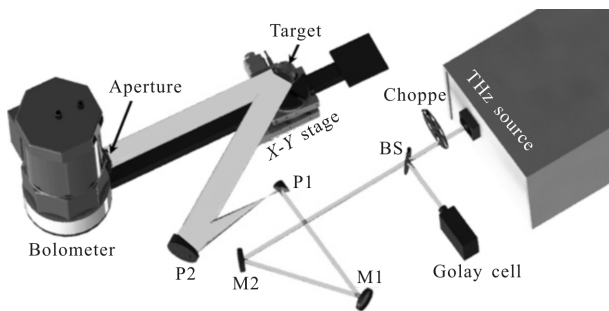


图 1 雷达散射截面测量实验系统整体组成

Fig.1 Composition of the experimental system for radar cross section measurement

根据测量 RCS 时对入射光的要求,目标需要完全覆盖在均匀的太赫兹辐射场中,系统中采用一组表面镀有抗氧化金膜的离轴抛物面镜($f_1=12.7\text{ mm}$, $f_2=254\text{ mm}$)对太赫兹光进行了共焦点扩束,得到准平面波太赫兹辐射场,辐射场呈直径为 60 mm 的圆形分布,经过对扩束后光斑的扫描测量,证明在整个光斑范围内光强分布均匀,符合 RCS 测量的要求。由于目标体对太赫兹波的散射信号较弱,为提高探测精度和灵敏度,系统中采用了低温液氮制冷 Bolometer 探测器(4.2-K)采集散射信号。为减少背景散射,待测目标体支架由高透过率白色聚乙烯材料加工而成,同圆心固定于双层独立转台上方,转台及支架均经过严格水平准直,可同时实现单站和双站散射截面的测量。系统中的双层独立转台也为同轴心设计,在具有一定承载能力的基础上可实现转动精度 0.075° ,配合 Labview 软件编程实现转台自动控制与双路同步数据采集。受限于实验室空间环境及探测器体积,太赫兹发射与接收装置无法完全处于同一位置,因此在测量单站 RCS 时会存在 15° 双站角,按照在太赫兹发射方向上的投影计算会存在 3.4% 的测量误差。系统太赫兹光总行程为 177.5 cm,探测器与目标体间的距离约为 60 cm,通过改变探测器窗口前可变光阑的大小,实现空间角度分辨率为 0.95° 。整个系统中被测目标体及光路周围均固定有低密度泡沫作为吸波材料来降低环境噪声的干扰。

2 系统可靠性验证

目前国内针对太赫兹 RCS 的报道依然多见于理论仿真,实测的实验也多为基于微波倍频源的低频段 100~440 GHz。高频段实验研究缺乏前期大量实验结果的比对,因此首先需要对系统的可靠性进行验证,以保证测量结果的准确性。该测量系统中太赫兹源为 3.11 THz 单频点连续输出,单频信号的谱分析法是通过在时域上进行信号和噪声的功率谱测量,然后由下述公式计算系统的信噪比(SNR):

$$\text{SNR} = 10 \cdot \lg \left(\frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} \right) \quad (1)$$

通过分别测量无目标体时的太赫兹辐射场功率谱和放置标准金属球体时的回波信号功率谱,由公式(1)得到系统信噪比曲线如图 2 所示。系统整体信噪比可以维持在 23~25 dB,满足 RCS 测量的要求。

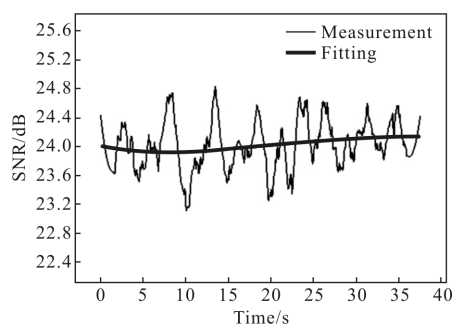


图 2 实测系统信噪比变化曲线

Fig.2 Measured system SNR variation curve

RCS 是衡量目标体对入射电磁波散射能量的物理量,无论是基于电磁散射理论还是基于雷达测量理论,实际目标体的 RCS 都是单位立体角内目标朝着接收方向散射功率与入射平面波功率密度比值的 4π 倍。因此 RCS 可定义为:

$$\sigma = 4\pi \cdot \frac{P_s}{P_i} \quad (2)$$

式中: P_s 为接收天线所张立体角内的散射功率; P_i 为目标体照射功率密度/单位面积。基于上述公式,实验过程中实际 RCS 测量是采用“相对定标法”来进行的。将待测目标和已知精确 RCS 值的定标体先后置于转台样品支架上,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:

$$\sigma = \frac{P_r}{P_0} \sigma_0 \quad (3)$$

式中： P_r 为目标体回波功率； P_0 为定标体回波功率； σ_0 为定标体精确 RCS 值。由电磁散射与红外辐射理论可知，光滑金属球作为太赫兹频段标准体的 RCS 解析解趋于一致，公式如下：

$$\sigma_0 = \pi r_0^2 \quad (4)$$

式中： r_0 为球体半径。在保证系统信噪比的前提下，通过实验测量直径为 40 mm 的光滑金属球体来验证“相对定标法”数据的准确性，标准球体的 RCS 实测与理论值的对比如图 3(a)所示。在实际测量过程中采集到的原始数据会有随机噪声，通过 S-G 滤波实现对实验测量原始数据与理论之间的差值局部数据进行多项式回归，在有效保留数据原始特征的前提下去除部分激光器及探测器随机噪声的影响。对所得结果进行四阶多项式拟合得到测量值与理论值的误差曲线，如图 3(b)所示。实验结果显示系统的测量误差可以保证在 3 dB 以内的有效范围。

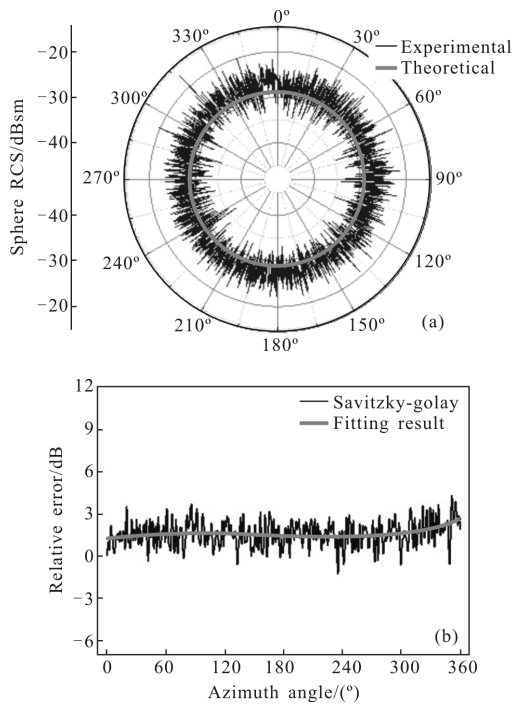


图 3 (a)球体实测 RCS 与球体理论 RCS 值对比,(b)金属球体测量真值与测量值的误差

Fig.3 (a) Comparison of sphere RCS between theory and measurement, (b) error of metal sphere between true and measured values

3 实验结果与讨论

通过该系统测量了一系列目标体的太赫兹

RCS。针对太赫兹雷达在航空航天领域的良好应用前景,实验测量的目标材料选为航空铝和不锈钢。分别加工制作了直径为 30 mm 圆形平板和底部直径分别为 10、20、30 mm 的圆锥体。同时对平板目标体进行了不同涂覆层处理,其中 P304 不锈钢材料未经处理,航空铝平板除了未经处理的样品外,还有分别进行了阳极氧化和表面喷漆处理的两组样品。

3.1 金属平板 RCS 测量

四种金属平板的实物图如图 4 所示,从左往右依次为 P304 不锈钢、纯航空铝、表面阳极氧化航空铝和表面喷漆航空铝。

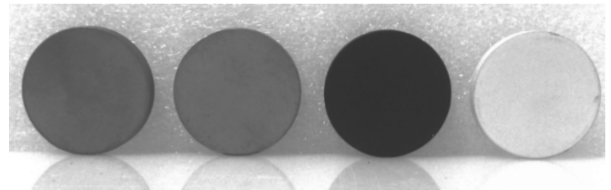


图 4 圆形金属平板照片

Fig.4 Photograph of the round metal plate

测量过程中太赫兹辐射场垂直入射到平板的一个表面,由目标转台自动旋转一周完成单站 RCS 测量,实验测量的 RCS 结果如图 5 所示。从图 5 中不

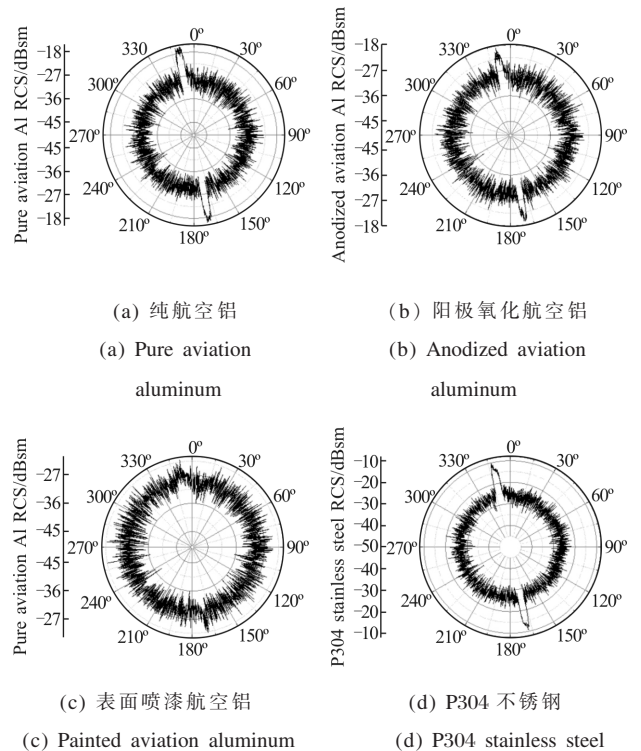


图 5 金属平板的 RCS

Fig.5 Metal plate RCS

难发现,目标体旋转一周的单站 RCS 有一组对称来源于平板两个侧面的强回波信号峰,对于未经涂覆处理的航空铝和 P304 不锈钢样品的表面反射峰值更加强烈,而对于阳极氧化和表面喷漆的航空铝 RCS 有所下降,由于喷漆的厚度较阳极氧化层更厚,其 RCS 的抑制效果也更好。由于 3.11 THz 频点 RCS 缺乏实验数据的比对,目前国内报告的相近工作多为理论仿真,对于平板选取入射太赫兹波反射角位置以及平板侧面对测量结果进行了分析与比较,从表 1 数据中平板反射特征峰可以看出,表面阳极氧化处理和表面喷漆处理的航空铝 RCS 比纯航空铝分别减小了约 3 dBsm 和 7 dBsm,纯 P304 不锈钢比纯航空铝高出约 5 dBsm。

表 1 圆形金属平板特征点 RCS 比较(单位: dBsm)

Tab.1 RCS comparison for characteristic points of round metal plate(Unit: dBsm)

Position	P304 stainless steel	Pure aviation aluminum	Anodized aviation aluminum	Painted aviation aluminum
Angle of reflection	-12.74	-17.64	-20.67	-24.61
Side-surface	-26.41	-29.33	-29.59	-29.67

3.2 圆锥体 RCS 测量

实验中测量的圆锥体表面粗糙度均为 1 μm,底面直径分别为 10、20、30 mm,如图 6 所示。

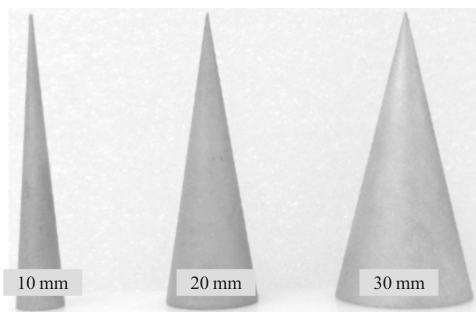


图 6 底面直径分别为 10、20、30 mm 的圆锥体目标照片

Fig.6 Photograph of the cones with different bottom diameters of 10, 20, 30 mm

在圆锥体侧面中心点位置处有一直径为 2 mm 的圆形螺纹孔用于固定和支撑,将圆锥体横向水平固定于自动转台上,调节圆锥体的中垂线严格水平。测量过程中太赫兹辐射场由圆锥体顶端入射,锥体

随上层转台旋转 360°并完成数据的自动采集。图 7 为三个圆锥体实测 RCS 曲线和圆锥体实物图。20 mm 直径的圆锥体 RCS 锥顶两侧面的反射峰最为明显,10 mm 和 30 mm 圆锥体侧面反射回波信号稍弱于 10 mm 的圆锥体,主要原因来自于锥体所处水平面与太赫兹辐射场的相对位置差别导致的,但底面峰值能更清晰的体现三个锥体 RCS 的变化趋势。对于圆锥体选取了锥体底面和侧面位置进行了比较,如表 2 所示,其中的数据展示了圆锥体的 RCS 在侧面反射峰和底面反射峰的变化趋势。底面直径由大到小,圆锥体的 RCS 值依次增大 3 dBsm。3.11 THz 不同表面粗糙度的样品 RCS 尚未见报道,现有文献中报告过 3.0 THz 仿真结果^[16],粗糙度为 50 μm 的圆柱 RCS 值低于 -40 dB,对于同一频点越粗糙 RCS 下降越大,因此从数据对比来看实验测量结果符合这一理论仿真变化规律。

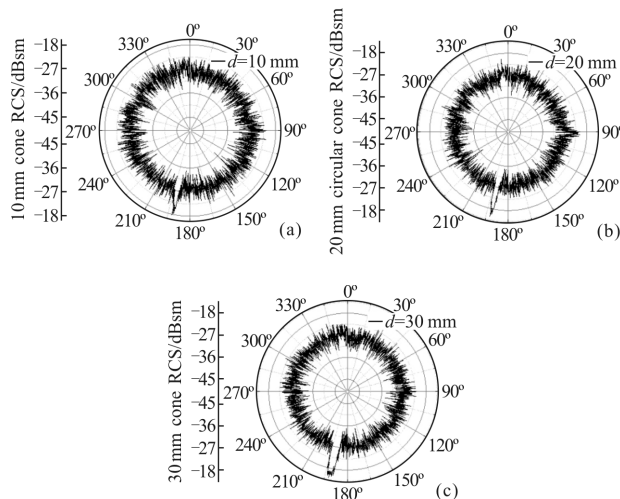


图 7 不同底面直径的圆锥体 RCS

Fig.7 RCS of cones with different bottom diameters

表 2 圆锥体特征位置 RCS 比较(单位: dBsm)

Tab.2 Comparison of cones RCS in feature points (Unit: dBsm)

Position	10 mm	20 mm	30 mm
Under-surface	-14.74	-17.57	-20.61
Side-surface	-23.71	-23.33	-23.51

目标支架在竖直方向的微小变化会引起在入射光场方向目标体姿态角的变化。从此次实验结果可以看到,对于圆锥体顶点两侧面回波信号受该影响

最大, 侧面回波峰的出现可以用来间接的分析姿态角变化引起的误差。在实际应用中这种变化的影响引起的误差不可忽略。

4 结 论

基于 FIRL-100 型连续太赫兹激光器搭建了一套 3.11 THz 频点的太赫兹针对近场太赫兹 RCS 测量系统, 利用双层独立转台设计可实现单双站 RCS 测量, 在此基础上进行了一系列实验研究工作, 主要研究内容及结论如下: (1) 利用光滑不锈钢标准球体对系统进行了可靠性验证, 得到系统信噪比约为 24 dB, RCS 实验测量与理论计算误差不超过 3 dBsm, 可以满足 RCS 的测量要求。(2) 基于该系统, 对不同金属平板及圆锥体的 RCS 进行了测量, 获得了不同材料、尺寸及处理工艺对目标 RCS 的影响, 并进一步验证了该系统对太赫兹频段 RCS 的测量能力, 为高频段太赫兹 RCS 的研究奠定了基础。

参 考 文 献:

[1] Xie Qi, Yang Hongru, Li Hongguang, et al. Explosive identification based on terahertz time-domain spectral system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24 (10): 2392–2399. (in Chinese)
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[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(10): 2392–2399.

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

[3] Zhang Xueqian, Zhang Huifang, Tian Zhen, et al. Simultaneous control of terahertz amplitude and phase with dielectric metamaterials[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0425004. (in Chinese)
张学迁, 张慧芳, 田震, 等. 利用介质超材料控制太赫兹波的振幅和相位[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(4): 0425004.

[4] E Yiwen, Huang Yuanyuan, Xu Xinlong, et al. Polarization sensitive terahertz measurements and applications [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 98–113. (in Chinese)
鄂轶文, 黄媛媛, 徐新龙, 等. 太赫兹偏振测量系统及其应用[J]. *中国光学*, 2017, 10(1): 98–113.

[5] Xu Wenzhong, Zhong Kai, Mei Jialin, et al. THz wave

attenuation characteristics in sand and dust [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 524–527. (in Chinese)
许文忠, 钟凯, 梅嘉林, 等. 太赫兹波在沙尘中衰减特性[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(2): 524–527.

[6] Qin Hua, Huang Yongdan, Sun Jiandong, et al. Terahertz-wave devices based on plasmons in two-dimensional electron gas [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 51–66. (in Chinese)
秦华, 黄永丹, 孙建东, 等. 二维电子气等离子体太赫兹波器件[J]. *中国光学*, 2017, 10(1): 51–66.

[7] Huang Peikang, Yin Hongcheng, Xu Xiaojian. Radar Target Characteristic [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2005. (in Chinese)
黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

[8] Jansen C, Krumbholz N, Geise R, et al. 1-scaled radar cross section measurements with terahertz-spectroscopy up to 800 GHz [C]//3rd European Conference on Antennas and Propagation, 2009: 3645–3648.

[9] 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 Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2012, 2(4): 424–431.

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

[11] 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 [C]//Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering, 2001, 4382: 229–240.

[12] Lonnqvist A, Mallat J, Raisanen A V. Phase-hologram-based compact RCS test range at 310 GHz for scale models [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2006, 54(6): 2391–2397.

[13] Li Z, Cui T J, Zhong X J, et al. Electromagnetic scattering characteristics of PEC targets in the terahertz regime [J]. *IEEE Antennas & Propagation Magazine*, 2009, 51(1): 39–50.

[14] Jin Y Q, Xu F. Composite scattering from electric-large target over randomly rough surface in numerical approaches [C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), IEEE, 2010: 3545–3548.

[15] Li H Y, Li Q. Influence of gaussian beam on terahertz Radar cross section of a conducting sphere[J]. *Journal of Infrared*,

- Millimeter, and Terahertz Waves*, 2013, 34(1): 88–96.
- [16] Jiang Yuesong, Nie Mengyao, Zhang Chonghui, et al. Terahertz scattering property for the coated object of rough surface[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015(2): 90–96. (in Chinese)
江月松, 聂梦瑶, 张崇辉, 等. 粗糙表面涂覆目标的太赫兹波散射特性研究[J]. 物理学报, 2015(2): 90–96.
- [17] Yang Yang, Yao Jianquan, Song Yukun, et al. Radar scattering cross section in different wave band for spherical targets [J]. *Laser and Infrared*, 2011, 41 (5): 552–556. (in Chinese)
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): 552–556.
- [18] Liang Dachuan, Wei Minggui, Gu Jianqiang, et al. Broad-band time domain terahertz radar cross-section research in scale models [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(21): 85–94. (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): 85–94.
- [19] 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.
- [20] Fan Changkun, 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*, 2016(11): 155–160. (in Chinese)
樊长坤, 李琦, 周毅, 等. 四种粗糙度铝板的 2.52 太赫兹后向散射测量研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2016(11): 155–160.