

太赫兹散射特性测量中光学系统的性能分析

余剑雨 夏志伟 李琦 赵永蓬 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 150080)

摘要 太赫兹目标散射特性的测量是太赫兹成像等研究领域的一个重要环节。在测量中,为了获得高准直度的宽光束和减少能量损耗,需引入离轴抛物面镜。但离轴抛物面镜的引入会带来装调困难。利用光学设计软件 Zemax,分别分析了光学系统中的准直系统和收集系统,通过对三个离轴抛物面镜的倾斜角和偏心距的分析,得出了在 118.83 μm 的太赫兹发射源中,系统可允许的离轴抛物面镜最大装调误差。

关键词 成像系统;太赫兹;离轴抛物面镜;散射特性测量;装调误差

中图分类号 TN29 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.s108003

Analysis of Performance of Optical System in Terahertz Scattering Measurement

She Jianyu Xia Zhiwei Li Qi Zhao Yongpeng Chen Deying Wang Qi

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

Abstract Terahertz (THz) scattering measurement is of great importance in many research areas such as THz imaging. To gain high-collimated, broad light and reduce loss of energy, off-axis parabolic mirrors are used during the measurement. However, the introduction of off-axis parabolic mirrors causes troubles in alignment. By using of optical design software Zemax, analyzing collimation system and collection system in the optical system. Through analysis of tilt angle and eccentricity of three off-axis parabolic mirrors, the maximum permissible alignment errors of off-axis parabolic mirrors in 118.83- μm THz emitter system are obtained.

Key words imaging systems; terahertz; off-axis parabolic mirrors; scattering measurement; alignment errors

OCIS codes 040.2235; 080.4228; 120.5820; 220.1140

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研究日益受到关注^[1-5],无论是在理论层面还是实验测量方面,对太赫兹目标散射特性的研究都是非常有意义的。太赫兹雷达散射截面测量始于 20 世纪末,主要针对球体、圆柱体等标准体和飞机等缩比模型^[6-9]。丹麦于 2010 年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 飞机模型的雷达散射截面测量实验,校准后的测量装置分辨率可达 0.2 mm^[10]。其中,扩束准直

发射光学系统由两个离轴抛物面镜组成,而收集光学系统由全反镜和离轴抛物面镜组成。离轴抛物面镜的应用是为了获得准直度高的宽光束照射和接收,同时减少能量损耗并使系统结构更为紧凑。

离轴抛物面镜在理论上可以得到高质量的光斑,但是调整难度大,对光轴失准的敏感度高,细微的偏差便会引发像散等畸变^[11-12]。针对太赫兹源波长 118.83 μm 时文献[10]的散射截面测量装置中的主要光学系统性能进行分析,本文重点讨论了两个 90°离轴抛物面镜和 1 个 15°离轴抛物面镜装调误差对光

收稿日期: 2013-08-02; 收到修改稿日期: 2013-09-04

作者简介: 余剑雨(1989—),男,硕士研究生,主要从事太赫兹目标特性测量方面的研究。

E-mail: shejianyu_hit@126.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

束质量的影响。

2 散射特性测量光学系统

采用的散射特性测量光路示意图如图 1 所示。太赫兹激光经过有效焦距分别为 25.4 mm 和 516.8 mm 的离轴抛物面镜 P1 和 P2 的扩束之后, 准直成平行光。平行光照射到目标表面, 其反射光通过平面镜的反射之后, 由焦距为 152.4 mm 的离轴抛物面镜 P3 进行收集聚焦, 并由直径为 6 mm 的单元探测器进行探测。激光输出频率为 2.52 THz, 束腰直径为 3.4 mm, 发散角为 2.5°, 待测目标的长度约为 100 mm。离轴抛物面镜和系统主要参数如表 1 和表 2 所示。

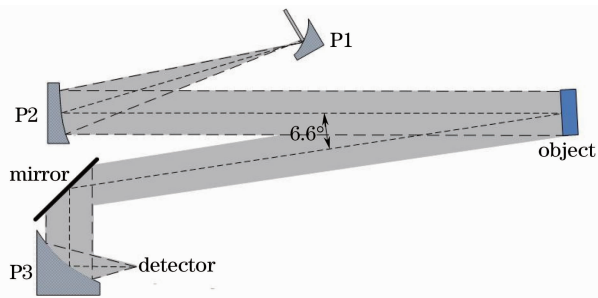


图 1 散射特性测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of scattering measurement system

表 1 离轴抛物面镜的主要参数

Table 1 Main parameters of off-axis parabolic mirrors

| | Off-axis angle / (°) | Mother focal length / mm | Diameter / mm |
|----|----------------------|--------------------------|---------------|
| P1 | 90 | 12.7 | 25.4 |
| P2 | 15 | 508.0 | 101.6 |
| P3 | 90 | 76.2 | 101.6 |

表 2 光学系统参数

Table 2 Optical system parameters

| | Collimation system | Collection system |
|------------------------------|--------------------|-------------------|
| Field (fullangle) / (°) | 2.5 | 6.6 |
| Entrance pupil diameter / mm | 3.4 | 100 |
| Dominant wavelength / μm | 118.83 | 118.83 |

3 基于 Zemax 软件的系统性能分析

3.1 准直系统性能分析

根据激光原始发散角, 分别取 0°、0.875°、-0.875°、1.25°、-1.25° 为观察视场。在光学设计软件 Zemax 中建立的模型如图 2 所示。

图 3 中给出了不同视场下的点列图, 其中光束最大发散角为 2.532 mrad, 小于系统的衍射极限



图 2 准直系统示意图

Fig. 2 Diagram of collimation system

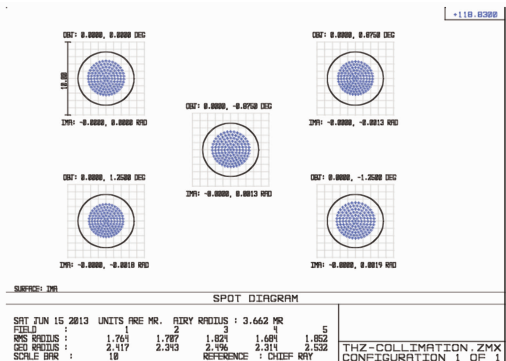


图 3 准直系统的点列图

Fig. 3 Spot diagram of collimation system

3.662 mrad, 这表明该系统已经达到衍射极限, 具有较好的准直和扩束效果。

在此光学系统中, 各元件之间的间距比较大, 光学像差对空气间隔的变化也不敏感, 一般由间距误差导致的像差较小。离轴抛物面镜摆放在水平工作台上, 在子午方向的倾斜或偏心误差也很小。因此, 着重研究弧矢方向的离轴抛物面镜的倾斜和偏心对系统的影响。

在此系统中, 如果离轴抛物面镜 P1 倾斜角 $\alpha_1 > 0.3^\circ$ 或偏心距 $d_1 < -0.65$ mm, 将导致 -1.25° 视场的光路偏折过大, 使光线溢出而落在离轴抛物面镜 P2 的有效口径外, 光能大量损失, 不能有效地照射到目标上进行探测。同样, 如果离轴抛物面镜 P1 倾斜角 $\alpha_1 < -0.5^\circ$ 或偏心距 $d_1 > 0.3$ mm, 将导致 1.25° 视场的光路偏折过大, 不能保证所有光线都能照射到目标上。实验中, 一般在参考光线指导下进行光路的装调, 可以有效避免以上情况的发生。

当 P1 倾斜 0.3° 时, 各视场最大发散角为 2.508 mrad, 如图 4 所示; 当 P1 倾斜 -0.5° 时, 各视场最大发散角为 2.513 mrad, 如图 5 所示; 当 P1 偏心距为 0.3 mm 时, 各视场最大发散角为 2.483 mrad, 如图 6 所示; 当 P1 偏心距为 -0.65 mm 时, 各视场最大发散角为 2.548 mrad, 如图 7 所示。而所有这些情况下的发散角均小于系统的衍射极限 (3.662 mrad), 因此可以认为在 P1 较小的倾斜和偏心误差时, 对系统的准直效果没有影响。此外, 对比以上点列图可以看出, 在视场对称的情况下, 光路系统并不是严格关于离轴抛物面镜成对称的。

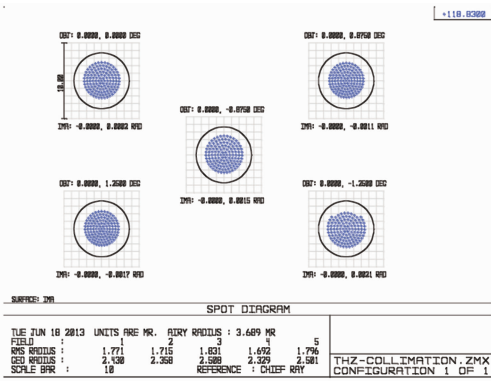


图 4 $a_1=0.3^\circ$ 时的点列图

Fig. 4 Spot diagram with $a_1=0.3^\circ$

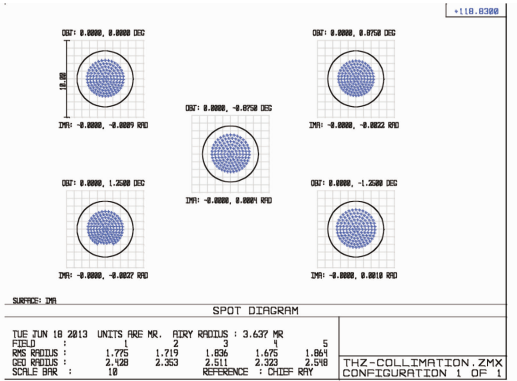


图 7 $d_1=-0.65$ mm时的点列图

Fig. 7 Spot diagram with $d_1=-0.65$ mm

2.554 mrad, 如图 10 所示; 当 P2 偏心距为 -0.3 mm 时, 各视场最大发散角为 2.520 mrad, 如图 11 所示。同 P1 的情况类似, 所有这些情况下的发散角均小于系统的衍射极限 (3.662 mrad), 因此同样可以认为 P2 较小的倾斜和偏心误差, 对系统的准直效果没有影响。

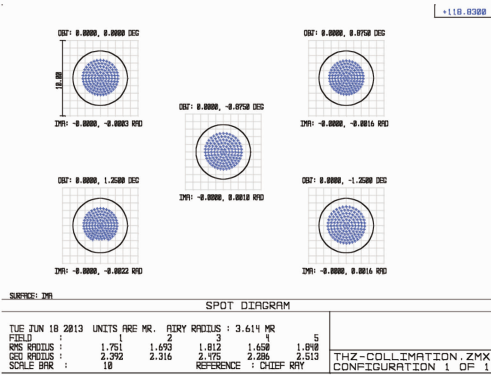


图 5 $a_1=-0.5^\circ$ 时的点列图

Fig. 5 Spot diagram with $a_1=-0.5^\circ$

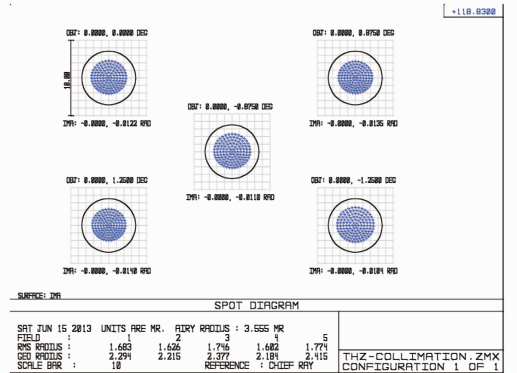


图 8 $a_2=0.36^\circ$ 时的点列图

Fig. 8 Spot diagram with $a_2=0.36^\circ$

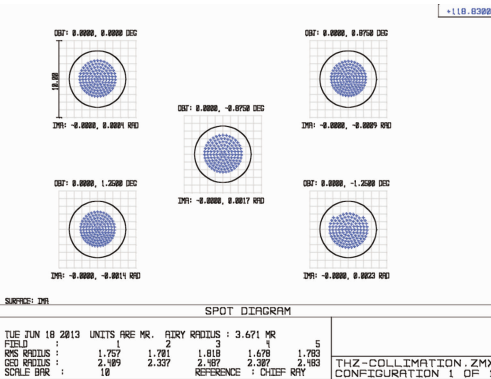


图 6 $d_1=0.3$ mm时的点列图

Fig. 6 Spot diagram with $d_1=0.3$ mm

在此光学系统中, 待测目标长度为 100 mm, 如果离轴抛物面镜 P2 倾斜角 $a_2 > 0.36^\circ$ 或 $a_2 < -0.33^\circ$ 、偏心距 $d_2 > 0.5$ mm 或者 $d_2 < -0.3$ mm, 都将导致光路偏折过大, 使光线溢出而完全落在待测目标之外, 能量损失较大, 不能照射到目标上进行探测。

当 P2 倾斜为 0.36° 时, 各视场最大发散角为 2.415 mrad, 如图 8 所示; 当 P2 倾斜为 -0.33° 时, 各视场最大发散角为 2.655 mrad, 如图 9 所示; 当 P2 偏心距为 0.5 mm 时, 各视场最大发散角为

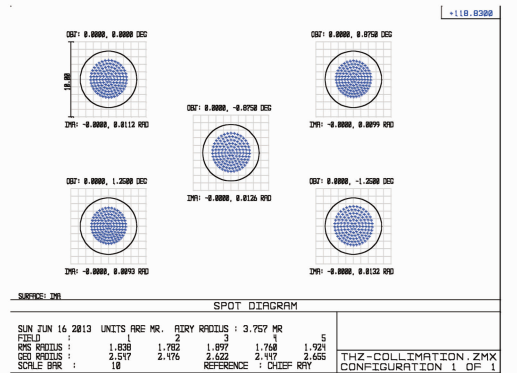


图 9 $a_2=-0.33^\circ$ 时的点列图

Fig. 9 Spot diagram with $a_2=-0.33^\circ$

图 4~11 中部分视场的发散角甚至比没有装调误差时还要小, 其原因在于装调误差的存在导致具有较大像差的光线落在光路的有效口径外, 使该视

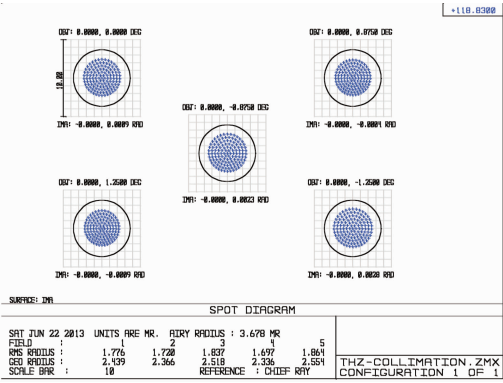


图 10 $d_2 = 0.5$ mm 时的点列图

Fig. 10 Spot diagram with $d_2 = 0.5$ mm

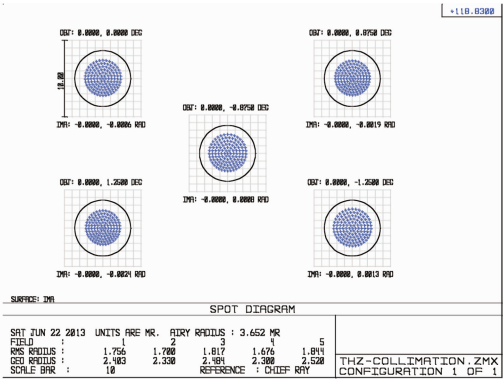


图 11 $d_2 = -0.3$ mm 时的点列图

Fig. 11 Spot diagram with $d_2 = -0.3$ mm

场内存在渐晕(弥散斑的形状已不完整),在一定程度上减小了像差。但是渐晕会降低系统的透射率,应尽量避免。

通过以上分析可知,在此光学系统中,当光路存在一定偏差,光线没有按照设计的路线传播,光路中存在渐晕,光线最终照射到待测目标上时,目标不能全部或大部分处于光束半峰全宽内,降低了待测目标的照度,进而影响了探测器的信噪比。因此,应当重视 P1 和 P2 安装过程中的装调误差,尽量将其减小。

3.2 收集系统性能分析

在 Zemax 软件中建立的模型如图 12 所示。收集系统将目标散射的光线聚焦到单元探测器上,此光学系统中,单元探测器半径为 3 mm。

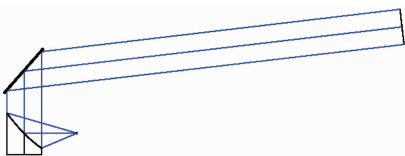


图 12 收集系统光路图

Fig. 12 Schematic diagram of collection system

图 13 中给出了不同视场下的点列图,其中各弥散斑的最大半径为 0.339 mm,略大于系统的衍射

极限 0.224 mm,这表明该系统已经接近衍射极限,具有较好聚焦和成像效果。对 100 mm 的待测目标成像后的半峰全宽为 1.935 mm,也完全位于单元探测器的有效探测区域内。

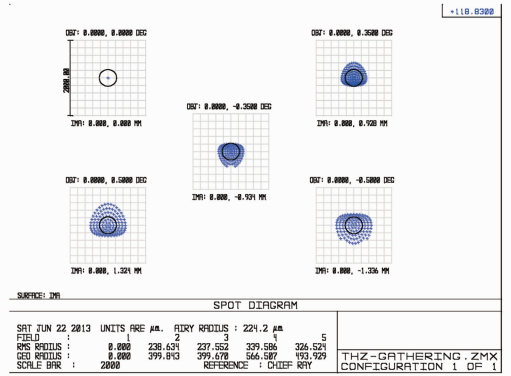


图 13 收集系统的点列图

Fig. 13 Spot diagram of collection system

如果离轴抛物面镜 P3 倾斜角 $a_3 > 0.3^\circ$ 或 $a_3 < -0.8^\circ$; 偏心距 $d_3 > 0.8$ mm 或者 $d_3 < -0.7$ mm, 都将导致部分光路偏折增大,溢出 P3 的有效口径外,损失光能量,影响探测的准确性。

当 P3 倾斜 0.3° 时,各视场下的最大弥散斑半径为 0.52 mm,增大为衍射极限的 2.32 倍,如图 14 所示;待测目标半峰全宽为 2.314 mm,仍完全处于单元探测器的有效口径内。当 P3 倾斜 -0.8° 时,各视场下的最大弥散斑半径为 0.866 mm,增大为衍射极限的 3.9 倍,如图 15 所示;待测目标半峰全宽为 2.726 mm,仍完全处于单元探测器的有效口径内。

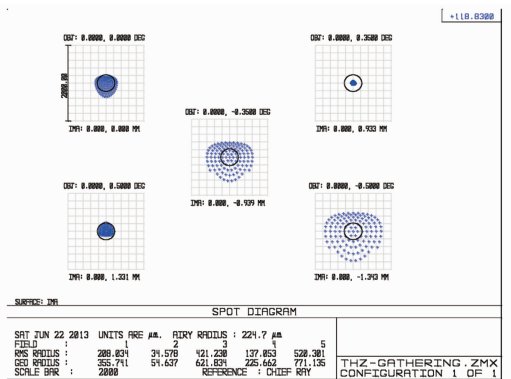


图 14 $a_3 = 0.3^\circ$ 时的点列图

Fig. 14 Spot diagram with $a_3 = 0.3^\circ$

当 P3 偏心距为 0.8 mm 时,各视场下的最大弥散斑半径为 0.405 mm,增大为衍射极限的 1.816 倍,如图 16 所示;待测目标半峰全宽为 2.17 mm,仍完全处于单元探测器的有效口径内。当 P3 偏心距为 -0.7 mm 时,各视场下的最大弥散斑半径为 0.384 mm,增大为衍射极限的 1.707 倍,如图 17 所

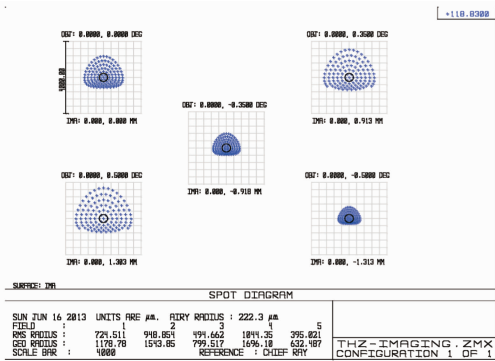


图 15 $a_3 = -0.8^\circ$ 时的点列图

Fig. 15 Spot diagram with $a_3 = -0.8^\circ$

示;待测目标半峰全宽为 2.088 mm,仍完全处于单元探测器的有效口径内。

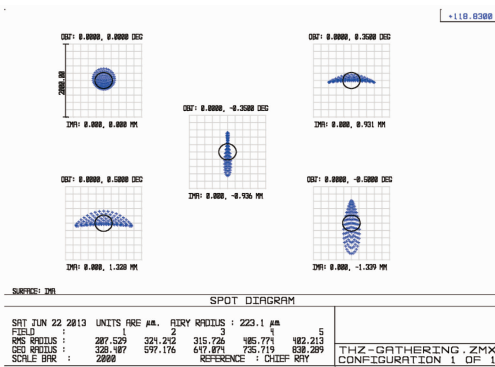


图 16 $d_3 = 0.8 \text{ mm}$ 时点列图

Fig. 16 Spot diagram with $d_3 = 0.8 \text{ mm}$

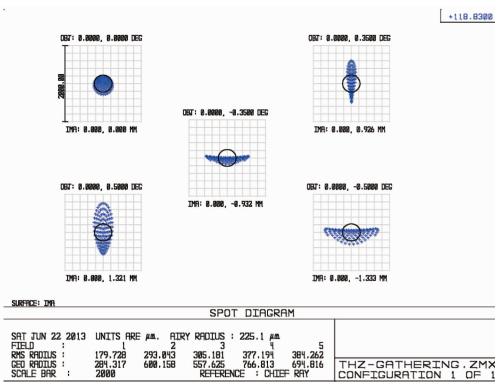


图 17 $d_3 = -0.7 \text{ mm}$ 时点列图

Fig. 17 Spot diagram with $d_3 = -0.7 \text{ mm}$

实验中,虽然单元探测器对系统的分辨率没有严格的要求,但 P3 的倾斜和偏心将导致弥散斑增大,从而使目标的像高增大。装调误差应控制在容许范围内,以保证目标的像完全聚焦到单元探测器的有效口径内。

4 结 论

利用 Zemax 设计软件对太赫兹散射截面测量系

统进行了建模分析。结果表明:1) 理想情况下,各视场弥散斑的最大半径为 2.532 mrad,小于系统的衍射极限 3.662 mrad,说明系统达到衍射极限,具有较好的准直和扩束效果;2) 为了保证所有光线都能照射到目标上,保证探测的准确性,准直系统中,离轴抛物面镜 P1 倾斜角必须在 $-0.5^\circ \sim 0.3^\circ$ 之间,偏心距为 $-0.65 \sim 0.3 \text{ mm}$;离轴抛物面镜 P2 的倾斜角应为 $-0.33^\circ \sim 0.36^\circ$,偏心距为 $-0.3 \sim 0.5 \text{ mm}$;3) 收集聚焦系统中,离轴抛物面镜倾斜角应为 $-0.8^\circ \sim 0.3^\circ$,偏心距绝对值为 $-0.7 \sim 0.8 \text{ mm}$ 。

参 考 文 献

- 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.
- Yang Yang, Yao Jianqun, Song Yukun, *et al.*. Radar scattering cross section in different wave band for spherical targets[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(5): 552-556.
- 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.
- 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 Huiyu, Li Qi, Xia Zhiwei, *et al.*. Influence of gaussian beam on conductor cylinder terahertz radar cross section[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(s1): s111002.
- 李慧宇, 李琦, 夏志伟, 等. 高斯光圆柱太赫兹雷达散射截面的影响[J]. *中国激光*, 2012, 39(s1): s111002.
- Li Huiyu, Li Qi, Xia Zhiwei, *et al.*. 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.
- 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 Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2000, 48(3): 417-422.
- T M Goyette, J C Dickinson, W J Gorveatt, *et al.*. X-band ISAR imagery of scale-model tactical targets using a wide bandwidth 350 GHz compact range[C]. *SPIE*, 2004, 5427: 227-236.
- 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.
- C Wu, A J Gatesman, L DeRoeck, *et al.*. Terahertz backscattering behavior of various absorbing materials[C]. *SPIE*, 2009, 7311: 73110M.
- Krzysztof Iwaszczuk, Henning Heiselberg, Peter Uhd Jepsen. Terahertz radar cross section measurements[J]. *Opt Express*, 2010, 18(25): 26399-26408.
- Luo Xi, Chen Peifeng, Wang Ying. Analysis of 90° off-axis parabolic mirror focal spot characteristic[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(3): 682-687.
- 罗曦, 陈培峰, 王英. 离轴 90° 抛物面镜焦斑特性分析[J]. *光学学报*, 2009, 29(3): 682-687.
- Li Qi, Xia Zhiwei, Yao Rui, *et al.*. Analysis of a terahertz array imaging system using optical design software [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(4): 0411001.
- 李琦, 夏志伟, 姚睿, 等. 基于光学设计软件的太赫兹面阵成像系统性能分析[J]. *中国激光*, 2011, 38(4): 0411001.

栏目编辑:何卓铭