

文章编号: 2095-4980(2014)02-0171-05

太赫兹散射特性测量中探测离焦量的分析

余剑雨, 夏志伟, 李琦, 赵永蓬, 陈德应, 王 骐

(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: 为研究太赫兹散射特性测量中探测器在离焦情况下的探测结果, 采用 ZEMAX 光学设计分析软件, 对太赫兹散射特性测量系统进行建模和仿真, 在探测器直径为 6 mm 的情况下, 对波长为 118.83 μm 的太赫兹发射源进行研究, 通过对像高的控制和对探测器各视场能量的仿真测量, 得出在离焦情况下系统所允许的最大离焦量为 -2.24 mm~1.86 mm, 为散射特性的实际测量提供理论支撑。

关键词: 太赫兹; 离轴抛物面镜; 散射特性测量; 离焦量

中图分类号: TN29

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201402.0171

Analysis of the detection defocus amount in the terahertz scattering measurement

SHE Jian-yu, XIA Zhi-wei, LI Qi, ZHAO Yong-peng, CHEN De-ying, WANG Qi

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

Abstract: Terahertz scattering measurement system is modeled and simulated in order to study the detection results when detector is out of focus in terahertz (THz) scattering measurement by using the optical design software ZEMAX. Under 6 mm of detector diameter and 118.83 μm of wavelength of terahertz emission sources, the image height is controlled and the energy of each field of view for the detector is measured by simulation. The allowable maximum defocus amount from -2.24 mm to 1.86 mm in the system is obtained when detector is defocused. This work provides theoretical supports in the scattering characteristics of the actual measurements.

Key words: terahertz; off-axis parabolic mirrors; scattering measurement; defocus amount

光学系统中, 一定距离的目标通过镜头成像于满足物像共轭关系的平面处, 该平面称之为像面。当接收器处于像面时, 得到清晰像, 称为聚焦; 偏离了这个位置, 图像质量下降, 成像模糊, 称之为系统离焦。能否将探测器位于正确的焦面上进行探测, 对一个光学系统是非常重要的^[1]。

用高灵敏度探测器探测较为微弱的激光时, 如雷达散射截面的探测等, 探测器的探测效果主要取决于有效传输到目标上的功率密度^[2]。目标上的功率密度除了与激光器的输出功率有关, 还与相应的聚焦光学系统有重要关系。在散射特性测量系统中, 为了获得高宽度、高准直度的平行光, 引入了离轴抛物面镜^[3-4], 但离轴抛物面镜会给系统带来较大的装调误差, 需要控制激光光束经光学系统后会聚在焦点上, 此时在焦点位置具有最大的功率密度。任何形式的离焦都将使弥散斑尺寸变大, 功率密度降低, 因此需准确控制输出激光的离焦情况, 并依据不同离焦量下的测量结果调整光学系统, 从而实现理想的探测。在太赫兹散射特性测量的离焦探测中, 这项技术已成为不可或缺的重要环节。近年来, 对太赫兹目标散射特性研究日益受到关注^[5-7]。太赫兹雷达散射截面测量始于 20 世纪末, 主要针对球、圆柱体等标准体和飞机等缩比模型。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力可达到 0.2 mm^[8]。文献[9]重点分析了光学系统中的准直系统和收集系统, 通过对 3 个离轴抛物面镜的倾斜角和偏心距的分析, 得出了 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。本文在文献[9]的基础上, 太赫兹源波长为 118.83 μm 时, 对文献[8]的散射特性测量装置中的探测器离焦量进行分析, 得出系统所允许的最大离焦量。

收稿日期: 2013-11-08; 修回日期: 2013-12-18

1 散射特性测量光学系统和探测原理

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。所用激光输出频率为 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。系统主要参数如表 1 所示。其中，P2 和平面镜距离目标的距离均为 1 200 mm，平面镜直径为 170 mm，平面镜到 P3 距离为 76.2 mm。为了易于研究，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。

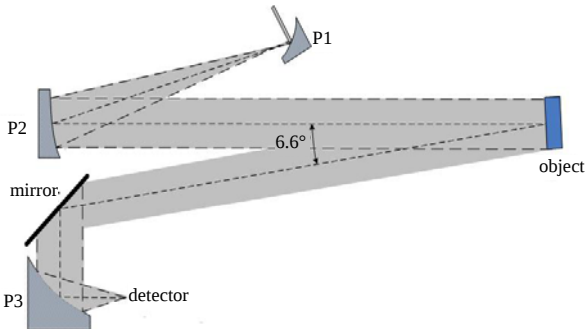


Fig.1 Schematic diagram of scattering measurement system
图 1 散射特性测量系统示意图

表 1 光学系统参数
Table1 Optical system parameters

	full field angle/(°)	entrance pupil diameter/mm	wave length/ μm
collimation system	2.5	3.4	118.83
gathering system	6.6	100	118.83

2 离焦量分析

理想情况下，后向散射收集系统将模型散射的光线聚焦到单元探测器上，单元探测器半径为 3 mm。图 2 给出了理想情况下(即他侧起光敏面恰好在聚焦面上)不同视场的点列图，其中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，表明该系统已接近衍射极限，具有较好的聚焦和成像效果。10 cm 的目标成像后半像高为 1.935 mm，完全位于单元探测器的有效探测区域内。衍射极限和 5 个视场在半径 3 mm 内的衍射包围圈能量分别为 99.66%,99.66%,99.65%,99.66%,99.65%,99.65%，此时，各视场和衍射极限的能量近似相等，如图 3 所示。

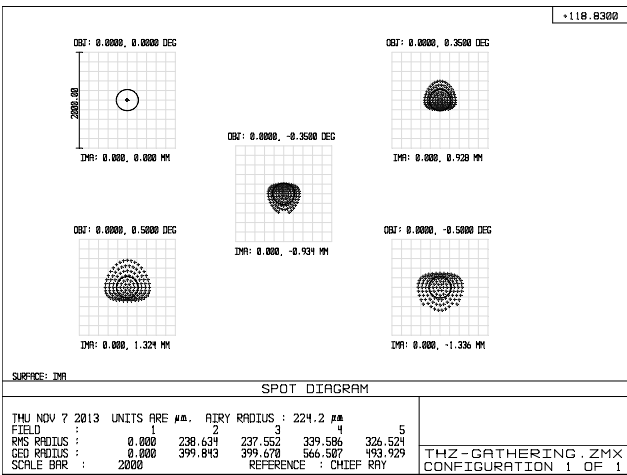


Fig.2 Spot diagram of ideal gathering system
图 2 理想情况下收集系统的点列图

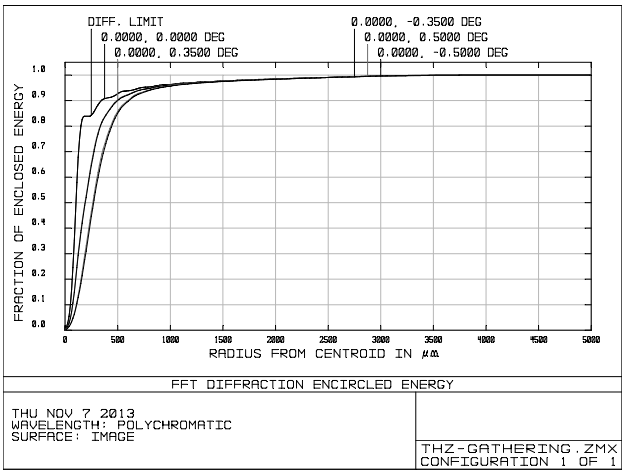


Fig.3 Ideal diagram of diffraction encircled energy
图 3 理想情况下衍射包围圈能量图

如果单元探测器没有恰好放置在 P3 的焦平面上，将使接收面具有一定的离焦量，导致弥散斑增大，像高增加，探测器将无法探测到全部的散射光，测量精确度受到影响。

当单元探测器的离焦量为-2.24 mm 时，各视场下的最大弥散斑半径为 0.690 mm，为衍射极限的 3.08 倍，如图 4 所示。目标半像高为 2.501 mm，仍完全处于单元探测器的有效口径内；衍射极限和 5 个视场在半径 3 mm

内的衍射包围圈能量分别为 99.66%,99.60%,99.61%,99.59%,99.61%,99.58%,可以看出,离焦对探测器所能探测到的能量有一定的影响,但在误差允许范围内,可以认为此时各视场和衍射极限的能量近似相等,如图 5 所示。

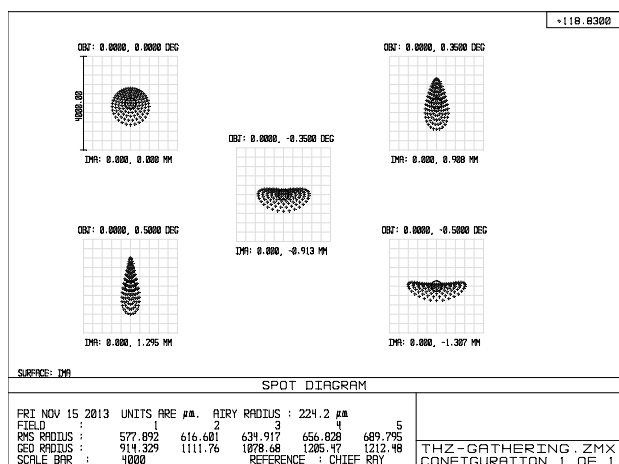


Fig.4 Spot diagram with the defocus amount of -2.24 mm

图 4 离焦量为-2.24 mm 时的点列图

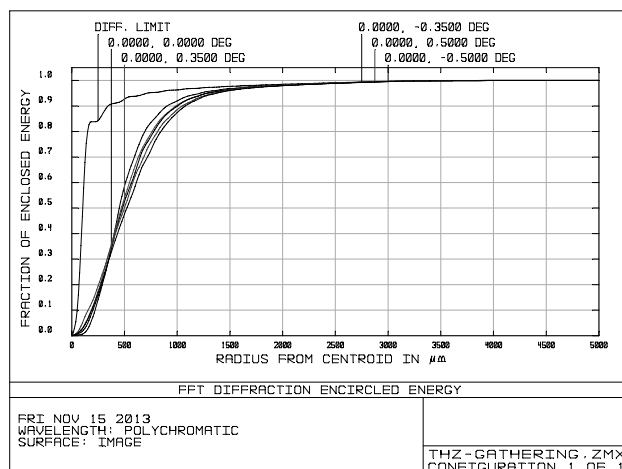


Fig.5 Diagram of diffraction encircled energy with the defocus amount of -2.24 mm

图 5 离焦量为-2.24 mm 时的衍射包围圈能量图

当单元探测器的离焦量为-4.07 mm 时,各视场下的最大弥散斑半径为 1.121 mm,为衍射极限的 5.00 倍,如图 6 所示。目标半像高为 2.999 mm,仍完全处于单元探测器的有效口径内。衍射极限和 5 个视场在半径 3 mm 内的衍射包围圈能量分别为 99.66%,99.40%,99.38%,99.39%,99.38%,99.37%,可以看出,此时探测器的离焦量对探测器所能探测到的能量产生了较大影响,衍射极限的能量明显高于其他视场的能量,如图 7 所示。

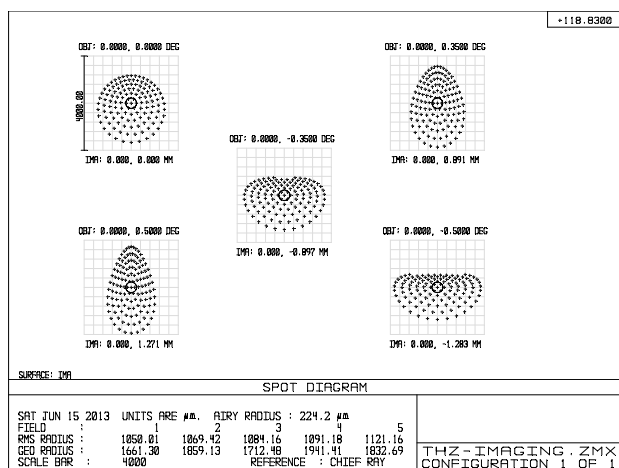


Fig.6 Spot diagram with the defocus amount of -4.07 mm

图 6 单元探测器的离焦量为-4.07 mm 时的点列图

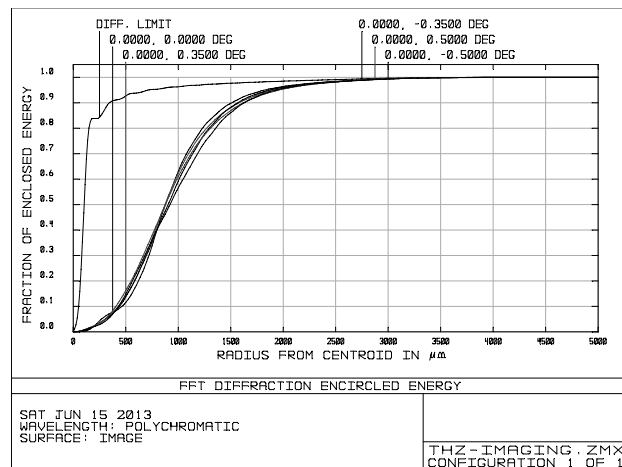


Fig.7 Diagram of diffraction encircled energy with the defocus amount of -4.07 mm

图 7 离焦量为-4.07 mm 时的衍射包围圈能量图

当单元探测器的离焦量为 1.86 mm 时,各视场下的最大弥散斑半径为 0.605 mm,为衍射极限的 2.70 倍,如图 8 所示。目标半像高为 2.499 mm,仍完全处于单元探测器的有效口径内。衍射极限和 5 个视场在半径 3 mm 内的衍射包围圈能量分别为 99.66%,99.63%,99.61%,99.63%,99.60%,99.63%,可以看出,离焦对探测器所能探测到的能量虽然有一定的影响,但在误差允许范围内,可以认为此时各视场和衍射极限的能量近似相等,如图 9 所示。

当单元探测器的离焦量为 3.51 mm 时,各视场下的最大弥散斑半径为 0.988 mm,为衍射极限的 4.41 倍,如图 10 所示。目标半像高为 2.999 mm,仍完全处于单元探测器的有效口径内。衍射极限和 5 个视场在半径 3 mm 内的衍射包围圈能量分别为 99.66%,99.53%,99.50%,99.53%,99.48%,99.54%,可以看出,此时探测器的离焦量对探测器所能探测到的能量产生了较大影响,衍射极限的能量明显高于其他视场的能量,如图 11 所示。

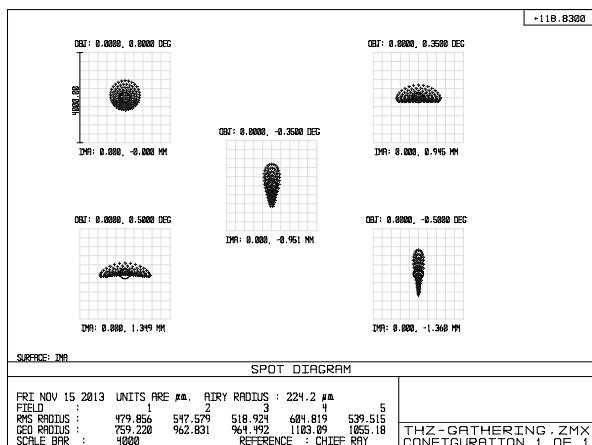


Fig.8 Spot diagram with defocus amount of 1.86 mm
图8 离焦量为1.86 mm时的点列图

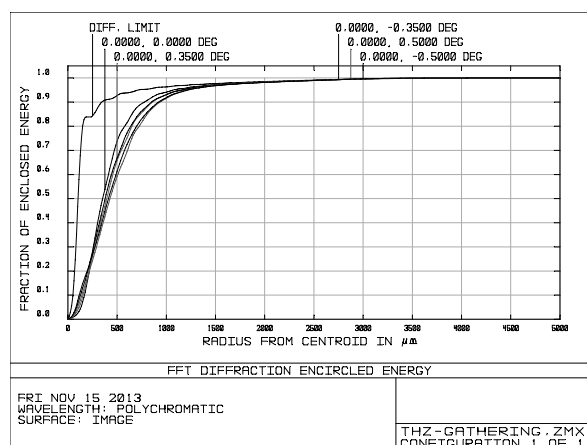


Fig.9 Diagram of diffraction encircled energy
with defocus amount of 1.86 mm
图9 离焦量为1.86 mm时的衍射包围圈能量图

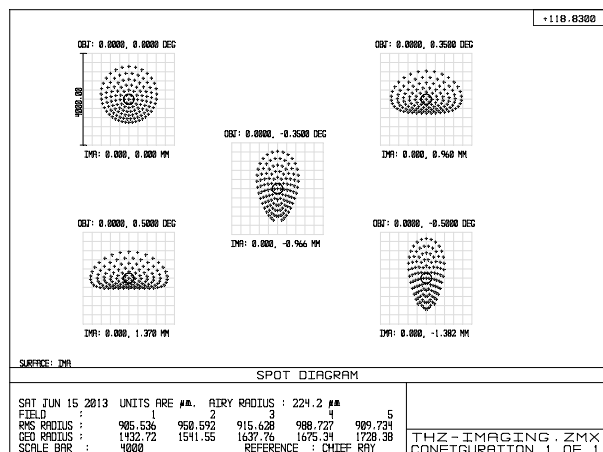


Fig.10 Spot diagram with defocus amount of 3.51 mm
图10 离焦量为3.51 mm时的点列图

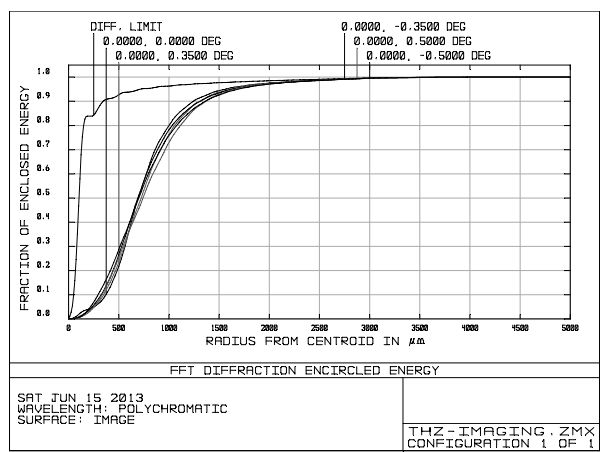


Fig.11 Diagram of diffraction encircled energy with
defocus amount of 3.51 mm
图11 离焦量为3.51 mm时的衍射包围圈能量图

综上所述,在不考虑单元探测器对系统分辨力的影响情况下,本系统所容许的离焦量为 $-4.07\text{ mm}\sim 3.51\text{ mm}$;为了使测量精确度尽可能高,本系统所容许的离焦量为 $-2.24\text{ mm}\sim 1.86\text{ mm}$ 。

3 结论

在波长为 $118.83\text{ }\mu\text{m}$ 的太赫兹发射源的雷达散射特性测量系统中,利用 ZEMAX 光学设计仿真软件对系统进行建模分析。在探测器直径为 6 mm 的情况下,重点研究了系统对探测器所允许的最大离焦量,为了使探测器探测的能量更为集中,探测结果更为精确,得出系统所容许的离焦量为 $-2.24\text{ mm}\sim 1.86\text{ mm}$,对实际实验的精确测量和光路调试起到一定的理论指导作用。

参考文献:

- [1] 赵海涛,王振华,韦承甫,等. 基于空间光学调制的离焦探测技术研究[J]. 舰船防化, 2009(1):38-42. (ZHAO Hai-tao, WANG Zhen-hua, WEI Cheng-fu, et al. Research on detection of defocus length based on optical modulator[J]. Defence on Ships, 2009(1):38-42.)
- [2] 杨伟,杨平,许冰,等. 正支共焦非稳腔的离焦像差特性[J]. 强激光与粒子束, 2007,19(10):1623-1626. (YANG Wei, YANG Ping, XU Bing, et al. Defocus characteristics in positive branch confocal unstable resonators[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007,19(10):1623-1626.)
- [3] 罗曦,陈培锋,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. (LUO Xi, CHEN Pei-feng, WANG Ying. Analysis of 90° Off-Axis Parabolic Mirror Focal Spot Characteristic[J]. Acta Optica Sinica, 2009,29(3):682-687.)

- [4] 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):225-229. (LI Qi, XIA Zhi-wei,YAO Rui,et al. Analysis of a Terahertz Array Imaging System Using Optical Design Software[J]. Chinese J. of Lasers, 2011,38(4):225-229.)
- [5] 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(B06):371-374. (LI Hui-yu,LI Qi,XIA Zhi-wei,et al. Influence of Gaussian Beam on Conductor Cylinder Terahertz Radar Cross Section[J]. Chinese J. of Lasers, 2012(B06):371-374.)
- [6] LI Hui-yu,LI Qi,XIA Zhi-wei,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.
- [7] 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):1-8. (LI Qi,XUE Kai,LI Hui-yu,et al. Advances in Research of Terahertz Radar Cross Section Measurements[J]. laser & Optoelectronics Progress, 2012,49(6):1-8.)
- [8] Iwaszczuk Krzysztof,Heiselberg Henning,Jepsen Peter Uhd. Terahertz radar cross section measurements[J]. Optics Express, 2010,18(25):26399-26408.
- [9] 余剑雨,夏志伟,李琦,等. 太赫兹散射特性测量中光学系统性能分析[J]. 中国激光, 2013,40(s1):08003. (SHE Jian-yu, XIA Zhi-wei,LI Qi,et al. Analysis of the Performance of Optical System in the Terahertz Scattering Measurement[J]. Chinese J. of Lasers, 2013,40(s1):08003.)

作者简介:



余剑雨(1989-),男,福建省莆田市人,硕士,主要从事太赫兹目标散射特性测量研究工作.email:shejianyu_hit@126.com.

夏志伟(1982-),男,河南省永城市人,硕士,主要从事太赫兹激光图像处理方面的研究工作.

李琦(1963-),女,哈尔滨市人,博士,教授,主要从事激光雷达与太赫兹成像等方面的研究工作.

赵永蓬(1973-),男,黑龙江省绥化市人,博士,教授,主要从事X光激光、EUV光刻、太赫兹技术.

陈德应(1965-),男,福建省建瓯市人,博士,教授,主要研究方向为强场物理、非线性光学、太赫兹技术及可调谐激光技术.

王骥(1942-),男,山东省莱州市人,博士,教授,主要从事激光空间技术、X激光等方向的研究工作.