

太赫兹散射特性测量中准直系统光学性能分析

余剑雨 李 琦 赵永蓬 陈德应

(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 为了研究太赫兹散射特性测量中准直系统的影响因素,利用 Zemax 光学设计仿真软件对太赫兹散射特性测量中的准直系统进行建模以及仿真。分别从出射激光的束腰和发散角这两个方面,研究了在 118.83 μm 的太赫兹发射源中,出射激光对准直光束的准直性、宽度和发散角的影响,为散射特性的精确测量提供一定的理论支撑。

关键词 成像系统;太赫兹;散射特性测量;准直系统;束腰;发散角

中图分类号 TN29 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.s111003

Analysis of the Optical Performance of Collimation System in the Terahertz Scattering Measurement

She Jianyu Li Qi Zhao Yongpeng Chen Deying

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

Abstract In order to study the factors of collimation system in the terahertz scattering measurement, the collimation system in Terahertz scattering measurement system is modeled and simulated by the use of the optical design software Zemax. From the laser beam waist and divergence angle of emission laser these two aspects respectively, in 118.83 μm terahertz emission sources, the effects of emission laser on collimation properties, width and divergence angle of collimated beam are studied, which provide theoretical supports in the scattering characteristics of the actual more accurate measurements.

Key words imaging systems; terahertz; scattering measurement; collimation system; beam waist; angle of divergence

OCIS codes 040.2235; 080.4228; 120.5820; 220.1140

1 引 言

太赫兹 (THz) 技术是 21 世纪科学研究的一个重要领域^[1-5]。近年来,对太赫兹目标散射特性研究日益受到关注^[6-8]。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^[9]。文献[10]初步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。但是在其准直系统的模型建立过程中,离轴抛物面镜 P1 和 P2 的焦点没有完全重合,因此实际准直后的束散角仅约为 5 倍,文中给出的发散角有误。为了提高准直系统的平行度,本文将对 P1、P2 共焦的准直系统进行分析,同时考虑到所用的激光器出射激光参数均为实验测量值,由于测量误差的存在,可能导致散射特性测量光路的准直光的参数发生变化。因此,本文从太赫兹出射激光的束腰直径和出射激光发散角两个方面,研究在 118.83 μm 的太赫兹发射源中出射激光对该系统平行光的准直性、宽度的影响,对实际实验的

收稿日期: 2014-01-22; **收到修改稿日期**: 2014-03-12

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

精确测量具有一定的引导作用。

2 散射特性测量光学系统

本文采用的散射特性测量光路示意图如图 1 所示^[9]。太赫兹激光经过有效焦距分别为 25.4 mm

和 516.8 mm 的 90° 离轴抛物面镜 P1 和 15° 离轴抛物面镜 P2 的扩束之后,准直成平行光,照射到目标表面。所用激光输出频率为 2.52 THz,初始束腰直径为 3.4 mm,发散角为 2.5°,待测目标的长度不小于 100 mm,P2 到目标的距离为 1200 mm。

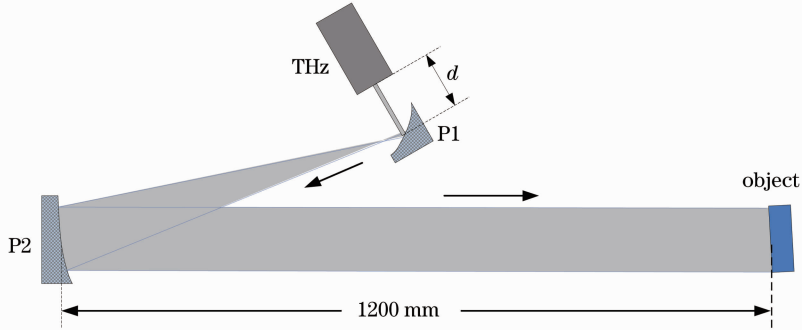


图 1 散射特性测量准直系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of collimation measurement system

利用光学设计软件对激光器到照射目标这段由激光器、两个离轴抛物面镜 P1、P2 组成的光学准直系统进行分析,在光学设计软件中建立的模型如图 2 所示。其中 $d=65$ mm,束腰直径为 3.4 mm。

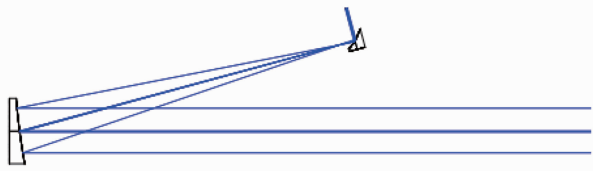


图 2 准直系统光路图

Fig. 2 Diagram of collimation system

在本系统中,光路准直系统的作用主要有两个:1)扩束作用,使光束宽度变宽;2)减小平行光束的发散角。图 3 给出了此时五个视场(分别为 0°、0.875°、-0.875°、1.25°、-1.25°)下的点列图,其中系统的艾

里斑半角为 2.096 mrad,弥散斑均方根(RMS)最大半角为 0.048 mrad,这表明该系统像差校正较好。经计算其准直光束发散角约为 1.18 mrad(半角)。与原先光束相比发散角压缩到约 1/20。通过 Zemax 仿真软件还可以看出此时的像高为 51.618 mm,具有较好的扩束作用,说明系统具有良好的准直和扩束作用。

在图 1 所示的系统中,离轴抛物面镜 P1、P2 的作用是扩束和准直作用。为了研究方便,可将 P1、P2 当成做一个透镜整体,其作用与薄透镜的作用类似。而出射激光可视为高斯光束,高斯光束通过薄透镜前后的束腰关系式如下:

$$\omega'_0 = \frac{F}{\sqrt{(1-F)^2 + f^2}} \omega_0, \quad (1)$$

即为物方高斯光束与像方高斯光束之间的关系。

由(1)式可以看出,在两组透镜确定的情况下, ω'_0 与 ω_0 成正比。即,入射激光束腰变大时,平行光的宽度也会相应变大。

在激光扩束望远镜系统中,扩束前后发散角 θ' 和 θ 的关系为

$$\frac{\theta'}{\theta} = \frac{\pi \omega_0^2}{f^2 \lambda}, \quad (2)$$

可以看出,在前后透镜确定的情况下,其发散角也是成正比的。故透镜焦距 f' 越长,入射光束束腰 ω_0 越小,则 θ' 越小,平行光的平行度越好。

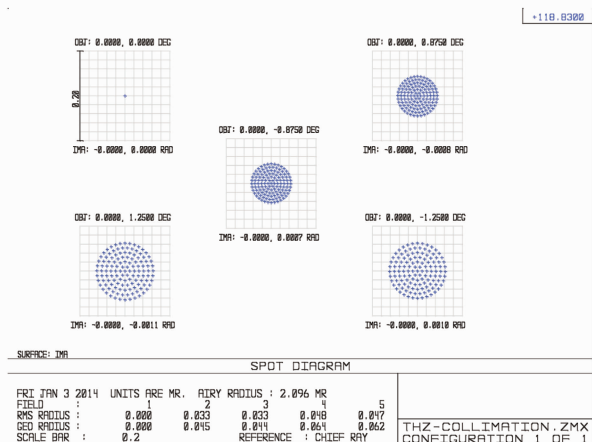


图 3 准直系统的点列图

Fig. 3 Spot diagram of collimation system

3 基于 Zemax 软件的系统性能分析

3.1 出射激光束腰对准直光的影响

在初始系统中,设定激光的束腰直径为 3.4 mm,

即为系统的入瞳大小。这个数据是实验中的初步测量结果,由于测量方法采用的是刀口法测量,而采用的探测器是面阵探测器,误差较大。为了研究出射激光束腰大小对平行光束的影响,按照误差为 20% 的比例,分别设定束腰直径为 2.72 mm 和 4.08 mm,对平行光的点列图和像高进行观察。

当束腰直径 φ 缩小至 2.72 mm 时,像高为 43.849 mm,比初始的 51.618 mm 小,说明准直光束的宽度变小。视场角仍为 0° 、 0.875° 、 -0.875° 、 1.25° 、 -1.25° ,此时的光路图和点列图分别如图 4 和图 5 所示。

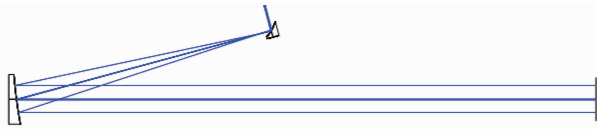


图 4 $\varphi=2.72$ mm 时的光路图
Fig. 4 Diagram with $\varphi=2.72$ mm

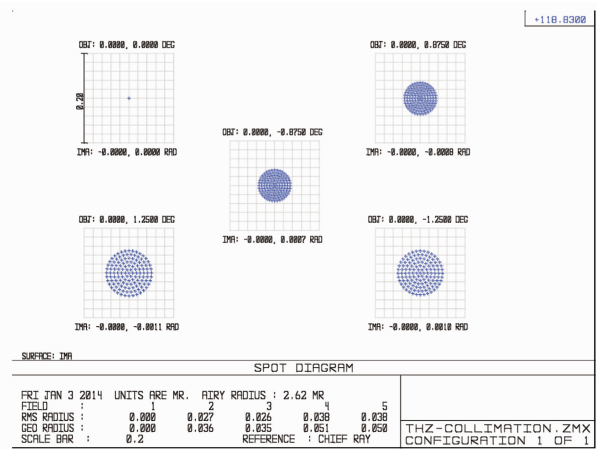


图 5 $\varphi=2.72$ mm 时的点列图

Fig. 5 Spot diagram with $\varphi=2.72$ mm

当出射激光束腰直径从 3.4 mm 减小到 2.72 mm 时,系统艾里斑半角增加到 2.62 mrad;而相应的弥散斑 RMS 半角从原先的 0.048 mrad 减小至 0.038 mrad。此时准直光束的发散角约为 1.17 mrad。说明出射激光束腰变小时,准直光束的发散角基本不变。

当激光束腰直径从 3.4 mm 增大到 4.08 mm 时,像高为 59.481 mm,大于初始系统像高 51.618 mm,说明准直光束的宽度变宽。此时的光路图和点列图分别如图 6 和图 7 所示。

由图可知,当束腰直径从 3.4 mm 增加到 4.08 mm 时,系统衍射极限从原来的 2.096 mrad 降低到 1.746 mrad;而相应的弥散斑 RMS 半角从原先的 0.048 mrad 增加至 0.057 mrad,此时准直光的发散角约为 1.19 mrad。说明出射激光束腰变大时,准直光

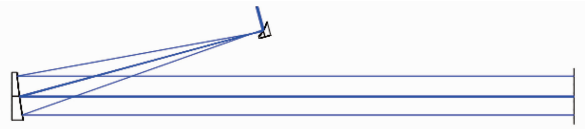


图 6 $\varphi=4.08$ mm 时的光路图
Fig. 6 Diagram with $\varphi=4.08$ mm

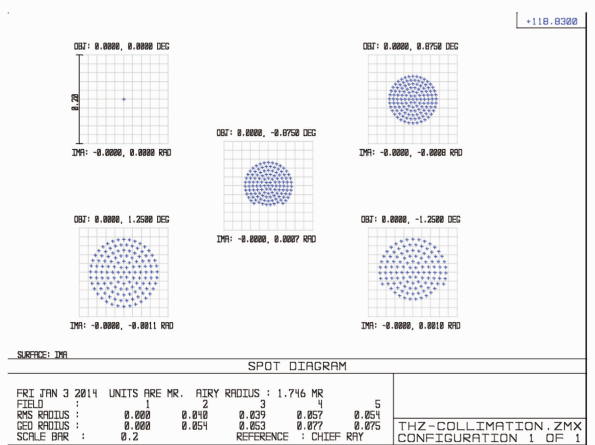


图 7 $\varphi=4.08$ mm 时的点列图

Fig. 7 Spot diagram with $\varphi=4.08$ mm

束的发散角也基本不变。出射激光束腰小幅度变大时,准直光仍具有比较好的平行度。但是此时点列图的 3、5 视场已经不完整,说明已有部分光线溢出离轴抛物面镜,会对实验测量精度产生影响。

3.2 出射激光发散角变化时对准直光的影响

初始系统中,设定的出射激光发散角 α 为实验中的初步测量的结果 2.5° 。为了研究出射激光发散角对平行光束的影响,按照误差为 20% 的比例,分别设定激光发散角为 2° 和 3° ,对准直光束的点列图和像高进行观察。

当发散角 α 缩小至 2° 时,像高为 48.241 mm,比初始的 51.618 mm 小,说明平行光的宽度变小。设定视场角分别为 0° 、 0.7° 、 -0.7° 、 1° 、 -1° ,此时的光路图和点列图分别如图 8 和图 9 所示。

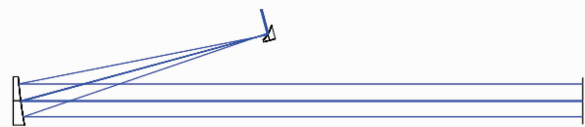


图 8 $\alpha=2^\circ$ 时的光路图
Fig. 8 Diagram with $\alpha=2^\circ$

当出射激光发散角从 2.5° 减小到 2° 时,系统艾里斑半角仍是 2.096 mrad;而相应的弥散斑 RMS 半角从原先的 0.048 mrad 减小至 0.038 mrad,此时的准直光束发散角约为 0.94 mrad。

当激光发散角从 2.5° 增大到 3° 时,像高为

4 结 论

利用 Zemax 光学设计仿真软件进行建模分析,研究了在波长为 $118.83 \mu\text{m}$ 的太赫兹发射源的雷达散射特性测量系统中,出射激光束腰和发散角的变化,对准直光束的平行度和宽度的影响。当出射激光发散角在 $2^\circ \sim 3^\circ$ 范围内,准直光束具有较好的像质和平行度,弥散斑 RMS 半角在 $0.038 \sim 0.057 \text{ mrad}$ 范围内。当出射激光束腰在 $2.72 \sim 4.08 \text{ mm}$ 时,准直光束仍具有较好的像质和平行度,弥散斑 RMS 半角在 $0.038 \sim 0.058 \text{ mrad}$ 范围内;在此范围内,系统的准直光束发散角基本不变,约为 1.18 mrad 。

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 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.
- 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 Alan 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): 417-418.
- 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.
- Zhang Hengwei, Xue Jianguo, Zheng Yongjun, *et al.*. Research on laser scattering measurement characteristics for large target [J]. *Electro Optic Technology Application*, 2007, 22(3): 49-51.
- 张恒伟, 薛建国, 郑永军, 等. 大目标激光散射特性测量研究[J]. *光电技术应用*, 2007, 22(3): 49-51.
- K Iwaszczuk, H Heiselberg, P U Jepsen. Terahertz radar cross section measurements [J]. *Opt Express*, 2010, 18(25): 26399-26408.
- She Jianyu, Xia Zhiwei, Li Qi, *et al.*. Analysis of performance of optical system in terahertz scattering measurement [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(s1): s108003.
- 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): s108003.

栏目编辑: 何卓铭

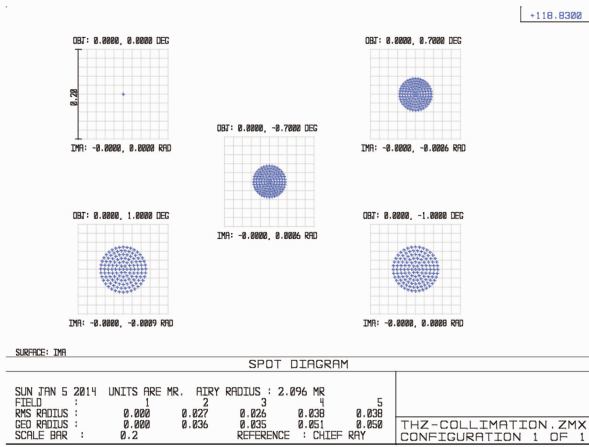


图 9 $\alpha=2^\circ$ 时的点列图

Fig. 9 Spot diagram with $\alpha=2^\circ$

55.088 mm, 大于初始系统像高 51.618 mm, 平行光宽度变宽。视场角分别为 $0, 1.05^\circ, -1.05^\circ, 1.5^\circ, -1.5^\circ$, 此时的光路图和点列图分别如图 10 和图 11 所示。

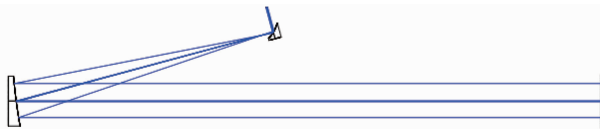


图 10 $\alpha=3^\circ$ 时的光路图

Fig. 10 Diagram with $\alpha=3^\circ$

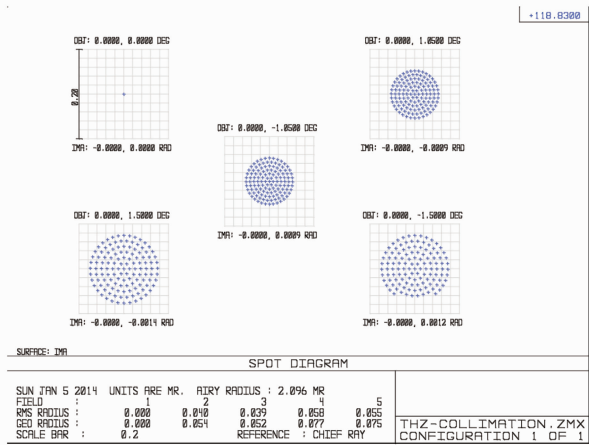


图 11 $\alpha=3^\circ$ 时的点列图

Fig. 11 Spot diagram with $\alpha=3^\circ$

由图可知,当发散角从 2.5° 增加到 3° 时,系统艾里斑半角依然是 2.096 mrad ;而相应的弥散斑 RMS 半角从原先的 0.048 mrad 增加至 0.058 mrad ,此时准直光束的发散角约为 1.43 mrad 。但是此时点列图的 5 视场已经不完整,说明已有部分光线溢出离轴抛物面镜 P2,会对实验测量精度产生影响。