

离轴抛物面镜像面扫描太赫兹光学设计

张 钊^{1,2}, 孙景旭¹, 刘则洵¹, 李宪圣¹, 任建岳¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为了提高太赫兹成像速度, 设计了一种像面扫描太赫兹快速成像系统。它为反射式单像素探测器成像, 成像系统采用新设计的表面镀金的离轴抛物面镜结构以实现大口径、无遮拦、高反射率、高质量成像; 反射成像系统光学设计 F 数为 2.93, 通光孔径为 100 mm, 视场为 $\pm 1^\circ$, 焦距为 293.45 mm, 成像窗尺寸为 64 mm×64 mm, 圆孔直径为 2 mm, 扫描采集 16×16 像素图像时间为 0.1 min, 32×32 像素图像时间为 0.42 min, 64×64 像素图像时间为 1.7 min, 空间分辨率为 1 cm。扫描系统结合压缩传感成像理论采用新型像面扫描方法实现快速成像, 在系统焦平面位置加入旋转多孔盘, 对像面的图像进行太赫兹能量强度扫描, 使用金属光锥收集能量到高莱探测器。利用压缩传感理论的特殊条件(采样数目与图像像素数相等)进行像面图像采集, 然后利用正则归一化方程重构像面图像, 该系统具有成像速度快、分辨率高、低成本、结构紧凑合理的优点。

关键词: 太赫兹; 离轴抛物面镜; 像面扫描; 光学设计

中图分类号: O59 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0725003

Optical design of THz image surface scanning with an off axis parabolic mirror

Zhang Zhao^{1,2}, Sun Jingxu¹, Liu Zexun¹, Li Xiansheng¹, Ren Jianyue¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to improve the THz imaging speed, an image surface scanning THz fast imaging system was designed. It was a single pixel imaging system basing on the reflection type. The system collected THz by an off axis parabolic mirror which was used to realize the imaging of large caliber, high transmittance, high quality imaging. The optical parameters of system were that $F/\#$ was 2.93, the aperture diameter was 120 mm, the field angle was $\pm 1^\circ$, the focus length was 293.45 mm, the size of imaging window was 64 mm×64 mm, the diameter of circular hole was 2 mm, the imaging speed of 16×16 pixels was 0.1 min, the imaging speed of 32×32 pixels was 0.47 min, the imaging speed of 64×64 pixels was 1.7 min, and the spatial resolution was 10 mm. The system combined with compressed sensing theory and image surface scanning theory realized the fast imaging property. A rotation plate with holes was inserted at image surface position, which scanned the THz intensity. Then a light cone was employed to collect energy to the Golay detector. The device output image by a special situation of compressed sensing theory that the sample number equaled to the image pixels. Sequentially, the regular least squares algorithm was used to reconstruct intensity distribution. The system has the property of high imaging speed and resolution, low costs, and small structure.

Key words: THz; off axis parabolic mirror; image surface scanning; optical design

收稿日期: 2015-11-24; 修订日期: 2015-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(61405191)

作者简介: 张钊(1989-), 男, 博士生, 主要从事航天遥感研究工作。Email: 250627410@qq.com

导师简介: 任建岳(1952-), 男, 研究员, 主要从事航天遥感研究工作。Email: Renjy@ciomp.ac.cn

0 引言

太赫兹波是频率在 0.1~10 THz 内的电磁波,位于红外波段与微波波段的中间,现在研究较多的中心区通常在 0.3~3 THz 范围。太赫兹电磁波也被称为 T 射线,属于远红外线和亚毫米波范畴。近 20 年来,太赫兹已经发生了深刻的变革,随着新材料提供了高功率的发射源,太赫兹已应用于越来越广的研究领域^[1]。太赫兹信号具有很强的穿透力,太赫兹成像技术广泛应用于材料检测、非破坏性测试、安全扫描和医疗领域等,太赫兹成像技术主要包括时域光谱成像、层析成像、全息成像和连续波成像等。时域光谱成像系统在电场的时域波形中提取反映样品信息的数据进行成像。时域成像工作带宽高,成像分辨率较高,但是扫描时间较长,相对于时域光谱成像,连续太赫兹成像只检测电磁波透过样品或经样品反射后的强度信息,不具备提供相位信息的能力,但是连续太赫兹成像系统具有较高的辐射功率、系统简单、价格低、成像速度较快、使用方便等特点,对于扫描物体比较大而又只需要检测缺陷或者透射性质,连续太赫兹成像具有明显的优势^[2]。

目前所用的 THz 成像技术主要为逐点扫描成像,但是逐点扫描成像会降低采样速度,目前机械逐点扫描方式得到一幅 100×100 像素的图像大概需要 20 min,而阵列式探测成像具有复杂程度高和成本高等缺点。因此,寻找更多、更好的 THz 成像方法也是目前 THz 成像研究的重点之一。基于像面扫描的离轴抛物面镜 THz 成像技术是将信号压缩方面的压缩传感理论应用于 THz 成像而发展出来的一种新的

成像技术。这种方法可以避免传统的机械逐点扫描,舍弃价格高昂同时系统复杂的太赫兹阵列探测器,结合离轴抛物面镜的高反射率消球差色差的优点,实现真正的高像质快速太赫兹成像方法。

1 原理

1.1 扫描原理

传统的信号获取和处理过程主要包括采样、压缩、传输和解压缩四个部分,必须满足香农定理,即采样频率不能低于模拟信号频率的 2 倍^[3]。在传统信号传递压缩过程中,先对信号进行变换,然后对少数绝对值较大的系数进行压缩编码,舍弃零或接近零的系数,这种数据压缩舍弃大部分之前采集得到的数据,虽不影响最终结果或图像,但是采集了许多浪费信息,既消耗时间又占用资源。如果信号本身是可压缩的,利用压缩感知理论可以直接获取信号的压缩数据,从而节省时间,减少不必要的数据采集过程^[3],其核心思想是可压缩信号在某个变换域是稀疏的,这样就可以用变换基与不相关的观测矩阵变化所得的高维信号投影到一个低维空间上,然后优化求解得到原始信号,这种方法突破了香农采样定理。压缩传感理论的测量过程是线性的^[4],假设 P 是一个长度为 N 的二维原始信号,测得值 Y 是原始信号在测量矩阵 Φ 下的线性投影^[5],投影公式:

$$Y_{M \times N} = \Phi_{M \times N} P_{N \times N}, \quad (1)$$

式中: M 表示测量次数,因此 Y 是一个长度为 $M \times N$ 的二维信号,当 $M=N$ 时, $\Phi_{M \times N}$ 为一个方阵,方程为适定方程,方便求解。图 1 为 2×2 像素图像根据公式(1)的计算过程图。

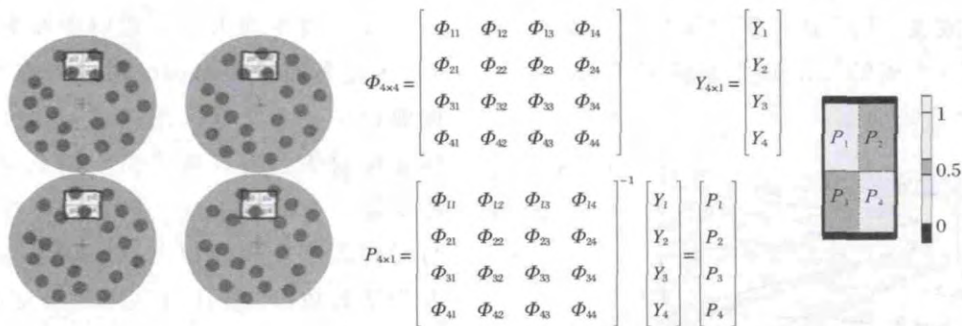


图 1 测量矩阵方程求解

Fig.1 Measurement matrix equation

1.2 成像方式选择

THz 光学系统需要根据应用场合来设计。目前光学系统的结构形式主要分为折射式、折反式及反射式。THz 光学系统设计应满足如下要求:

- (1) 小尺寸, 便于整机安装调试;
- (2) 尽可能大的相对孔径;
- (3) 满足要求的视场角;
- (4) 在所选波段内有最小辐射能损失;
- (5) 适应不同环境, 并具有可靠稳定的光学性能等。

折射(透射)式 THz 光学系统具有较大视场、低 F 数、加工装调工艺成熟、可消除各种像差、结构轻小紧凑、透射性好及性能稳定等特点。在二维成像光学系统中, 一般应用光电晶体进行探测, 光学系统物距远大于透镜焦距。其成像分辨率 $\Delta = 1.22\lambda D_i f / (D_o D_i)$; 当探测晶体尺寸、透镜直径及探测波长确定, 则可设计如图 2 所示的谐振/折射变焦光学系统来得到一定分辨率的图像^[6]。但该设计受到材料特性限制, 光能损失较大, 难以实现大口径、长焦距设计, 在提高相对孔径、压缩结构长度等方面有较大困难。

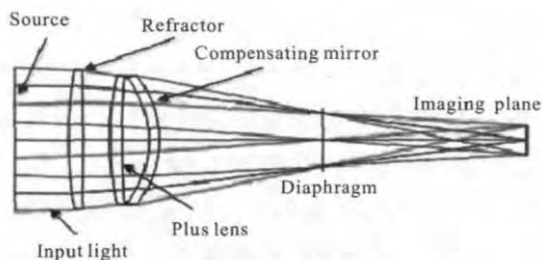


图 2 THz 谐振/折射变焦光学系统简图

Fig.2 Diagram of THz refraction zoom optical system

离轴三反射式 THz 光学系统具有易获得大口径反射材料、无色差且能较好地校正球差和彗差、光能损失小、工作波段宽、系统总长度短等优点。如图 3 所示, 其中图 3(a)为离轴三反光学系统简图; 图 3(b)为共轴三反光学系统简图。

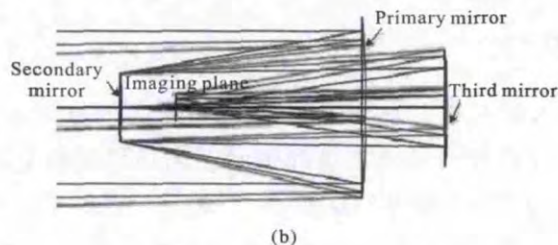
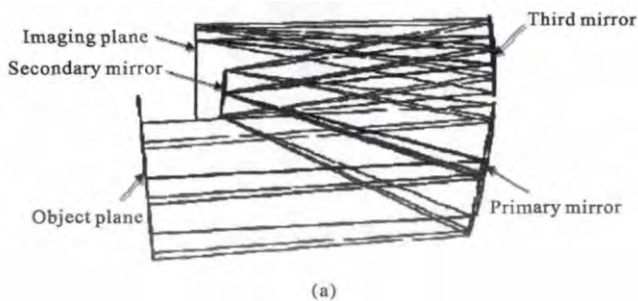


图 3 离轴三反(a)及共轴三反(b)光学系统简图

Fig.3 Diagrams of off-axis three-mirror optical system and on-axis three-mirror anastigmatic system

利用 ZEMAX 光学成像设计软件, 通过编写简单的 ZPL 宏指令及光阑和视场离轴实现初始结构计算, 再经优化计算而设计出理想的光学系统^[7]。但其 F 数较大, 中心挡光, 光机结构复杂性增大, 加工装调困难, 杂散光不易控制, 制作成本高, 难以满足大视场大口径成像要求。

由于目前在太赫兹波段具有良好透射性能的材料非常稀少, 适用于太赫兹波段的透镜难以获取, 同时适用于太赫兹材料的透镜对于可见光不适用, 系统的装调的难度很大。因此, 折射式和折反式系统在太赫兹波段难以实现, 离轴三反系统由于设计复杂, 系统 F 数较低, 装调难度大, 离轴抛物面镜系统受到材料限制影响较小, 反射材料较折射材料易于获得, 能量衰减小并且完全没有色差, 并且可以消除球差的影响, 适用波段宽, 系统透过率高, 便于轻量化设计, 而目前可购的离轴抛物面镜主要用于准直太赫兹波, 口径小, 不适用于远距离成像, 因此利用 ZEMAX 光学设计软件进行大口径高反射率离轴抛物面镜光学系统设计, 从而保证太赫兹成像质量。

1.3 成像原理

成像设备的工作原理是: 观测的瞬时视场所包含的目标被主动太赫兹辐射源照射反射出的太赫兹波, 通过离轴抛物面镜反射成像在焦面位置上, 通过像面扫描装置对像面图像进行强度扫描, 再通过金属光锥收集会聚在成像窗上的全部能量, 利用太赫兹单像素探测器进行采样。这样, 探测器得到数据是与瞬时圆盘在成像窗上对应图案与像面图像强度的内积结果数据。若让圆盘按照设定速度匀速转动, 在一次循环转动内让像面光与成像窗的不同图案多次内积, 同时记录每一次的内积结果, 即得到内积数据数组, 圆盘一次循环转动在每一时刻在成像窗上的

图案是固定的,即测量矩阵也是固定的,并且通过实验前标定可以得到,整个测量过程属于线性测量,最后通过测量矩阵逆矩阵与内积数组作积,反演出像面能量强度分布,得到原始信号即目标图像。使用设备前需要对圆盘矩阵进行测量,使用可见光积分球提供均匀光源照明,使照明到圆盘成像窗上的辐射亮度或照度几乎均匀,然后利用与 GOLAY 探测器采样频率一致的可见光波段探测器进行同频率采样和同频率同初始位置旋转测量一段时间范围内的单像素强度图像保存数据,由于像面的亮度或照度的均匀性很高,可以认为到达成像窗的能量是均匀的,将测到的强度归一化,然后利用相对测量方法测量成像窗位置的能量强度值,根据公式(1)的逆过程可以得到该圆盘圆孔在该频率该测试时间范围内的测量矩阵 $\Phi_{M \times N}$,当确定 $\Phi_{M \times N}$ 后即可在实际测量中使用矩阵来计算成像窗位置的能量强度。

图 4 为 CAD 设计的系统像面扫描圆盘示意图,成像窗尺寸为 $64 \times 64 \text{ mm}$,圆孔尺寸为 2 mm ,旋转速度与最终设定输出图像的像素数目大小相互对应。

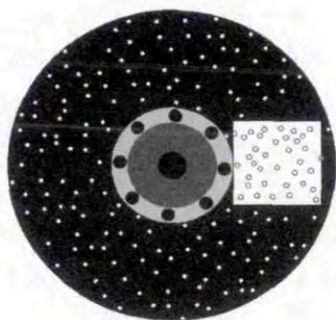


图 4 圆盘圆孔示意图

Fig.4 Schematic diagram of plate with holes

2 设备成像模式

由于自然界存在的太赫兹辐射能量较低,需要外置主动辐射光源对目标物体进行太赫兹主动照明,像面扫描太赫兹快速成像设备由主动辐射照明系统、反射成像系统、像面扫描系统、能量收集系统和探测系统组成,如图 5 所示。

主动式辐射系统由 CW 连续太赫兹辐射源 1 构成;反射式成像系统由自行设计的镀金离轴抛物面镜 2 构成;像面扫描系统由多孔圆盘 3、固定成像窗 4、旋转马达 5 构成;能量收集系统由太赫兹高反

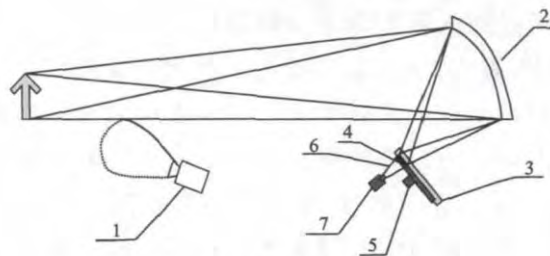


图 5 系统结构图

Fig.5 System structure

率金属光锥 6 构成;探测系统由太赫兹单像素 GOLAY 探测器 7 构成。CW 连续太赫兹辐射源提供几十毫瓦级别高功率辐射目标物体;镀金离轴抛物面镜可以实现大口径、高反射率、高质量成像,其通光口径为 120 mm ,设计像面处的系统的弥散斑直径远小于系统艾里斑直径,成像质量达到衍射极限;像面扫描系统通过固定成像窗和旋转多孔圆盘组成实现在像面处的动态扫描,让每一瞬时在成像窗内的多孔圆盘的图案与瞬时像面能量强度产生内积作用,马达带动圆盘旋转,在一个循环周期范围内内积有限数目的采样强度和圆盘图案、内积数目与最终要获得的图像的像素数目相等,当圆盘设计完成,旋转周期确定,则在一个周期内成像窗上显示的圆盘图案矩阵是确定值,对应结果图像像素数目,得到一个确定的测量矩阵 $\Phi_{M \times N}$;探测系统选用太赫兹 GOLAY 探测器,响应时间典型值为 25 ms ,采样频率高达 40 Hz ,在一个周期内采集确定数目的样本组成,测量数据 $Y_{M \times N}$ 。图像处理的原理是基于线性测量关系 $Y_{M \times N} = \Phi_{M \times N} P_{N \times N}$,通过测量矩阵与测量数据建立方程组,利用正则化最小二乘法

$$\hat{P} = \left[\Phi^T \Phi + \sum_i \mu_i H_i^T H_i \right]^{-1} \Phi^T \hat{Y} \quad (2)$$

快速准确求解,得到原始信号 $X_{N \times N}$ 即得到目标图像,根据上述原理分析计算采样时间,当成像窗尺寸为 $64 \times 64 \text{ mm}$,根据探测器采样频率典型值为 40 Hz 计算可以得到:当重构像素数为 256 时,采样时间为 0.1 min ;当重构像素数为 1024 时,采样时间为 0.42 min ;当重构像素数为 4096 时,采样时间为 1.7 min 。

3 设计实例

光学系统设计时以位于反射镜前的虚拟面为全局坐标参考面,在共轴反射式光学系统的设计基础

上, 通过加入离轴偏心与倾斜量优化得到完善的系统设计。首先, 在共轴系统的基础上根据几何光学和像差理论可知, 共轴系统的焦距为反射镜曲率半径的 1/2, 即 $f=r/2$, 计算得到了光学系统初始结构包括反射镜顶点的曲率、圆锥系数、间隔等参数, 然后设置系统的入瞳直径尺寸大小、反射镜的曲率半径和厚度间隔大小, 像面尺寸设置为与成像窗宽度相等, 系统偏心量由公式(3)计算:

$$z=\frac{cr^2}{1+\sqrt{1-(1+k)c^2r^2}} \tag{3}$$

式中: c 为顶点曲率半径; r 为透镜的径向坐标单位; k 为非球面系数常数。 $k<-1$ 时为双曲面, $k=-1$ 时为抛物面, $-1<k<0$ 时为椭圆面, $k=0$ 时为球面。因此取 $k=-1$ 。根据公式(3)设置反射镜初始离轴偏心量值, 同时设置像面的偏心量和倾斜量与反射镜相对应, 这样可以保证像面处成像质量, 然后再对反射镜进行离轴偏移量和倾斜量的优化, 通过设定 Merit Function 优化函数的阈值, 得到最终设计结果: 偏心量 DY 表示相对参考面的 y 方向偏心; 倾斜角度 TX 表示相对参考面绕 x 轴的旋转角度, 顺时针为正, 逆时针为负; 非球面系数 Conic/4th 表示透镜表面圆锥系数/4 次非球面系数。离轴抛物面镜光学设计图如图 6 所示, 光学设计系统结构参数见表 1。

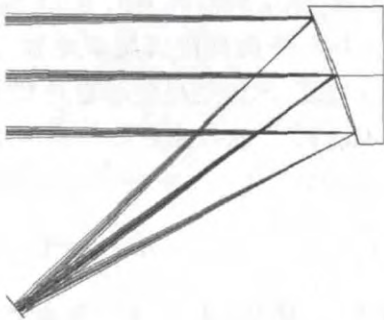


图 6 离轴抛物面镜设计图
Fig.6 Optical design diagram of parabolic mirror

图 7 为 5 个不同物方视场位置下系统未加倾斜

的弥散斑图, 可以看出未加倾斜的像面具有明显的彗差。图 8 为加入与对应抛物面镜倾斜量后像面的弥散斑图, 可以看出系统的弥散斑图像较好, 比艾里斑尺寸小很多, 系统存在衍射效应, 这是由于太赫兹波长较长引起的, 此时需要从物理光学的角度去分析成像效果。为了更准确地判断最终像面的成像质量好坏, 还需要观察系统的调制传递函数(MTF)曲线、衍射能量集中度曲线以及系统点扩散函数曲

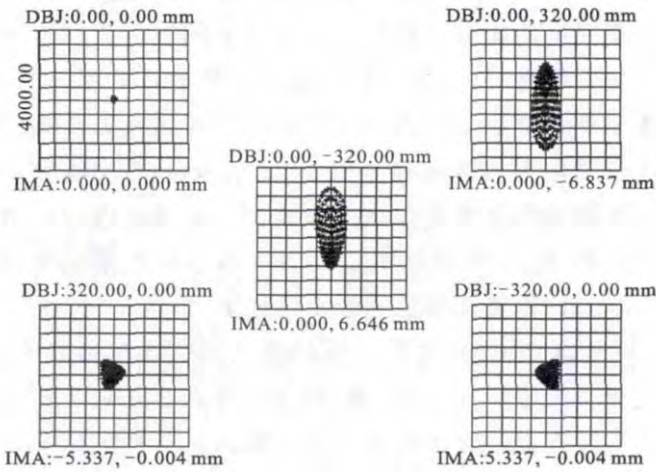


图 7 未加倾斜系统点斑图
Fig.7 Spot diagram of optical system without tilt

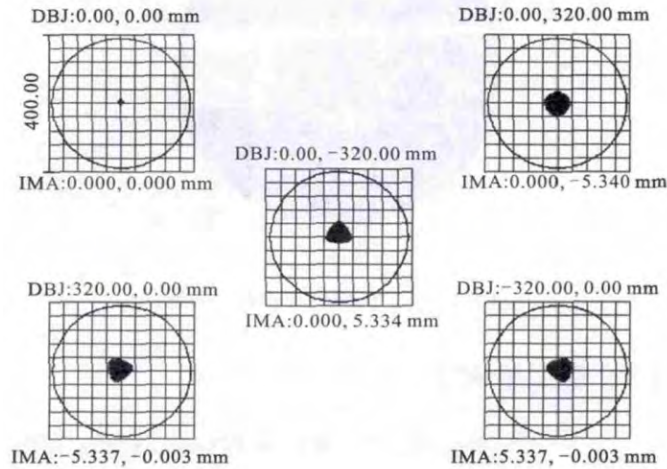


图 8 系统的点斑图
Fig.8 Spot diagram of optical system

表 1 光学设计参数
Tab.1 Parameter of optical design

Surface	Radius/mm	Interval/mm	Offset DY /mm	Tilt angle TX /($^{\circ}$)	Material	Aspheric coefficient
Object surface	∞	20 000	0	0	Air	0/0
Mirror	-586.905	-297.780	200	0	Mirror	-1
Imaging plane	∞	0	-203.344	-37.636	Air	0

线,当成像窗划分像元尺寸设定为 1 mm 时,空间分辨率为 1 cm。

MTF 反映了光学系统对不同空间频率成分的传递能力,对于一个成像系统来说,MTF 越大,成像质量越好,可以看出光学系统 MTF 基本达到衍射极限,在截止频率处各视场传递函数值都在 0.5 以上,成像质量良好。

图 9 为设计系统在 5 个不同物面尺寸——0, $x: \pm 320$ mm, $y: 3 \pm 20$ mm 处的 MTF 曲线,成像质量接近衍射极限。

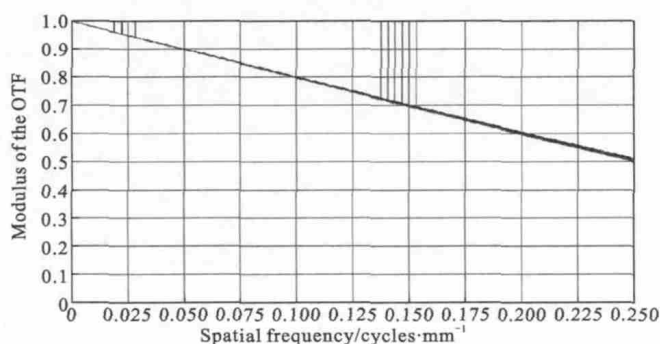


图 9 系统传递函数图

Fig.9 MTF of optical system

衍射能量集中度曲线显示像面上能量分布的情况,它的横坐标表示以主光线为中心的圆的半径,纵坐标表示该圆所包含的能量占总能量的百分比,从图 10 可以看出:在喇叭口大小 5 mm 范围内探测器能够接收将近 90% 的能量,能量集中度基本达到衍射极限,满足设计要求。

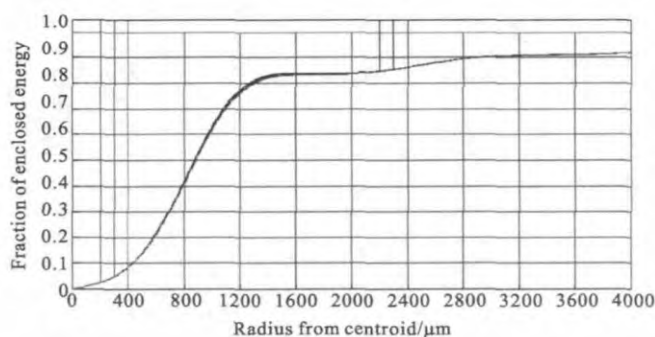


图 10 系统衍射能量集中度曲线

Fig.10 Diffraction energy concentration curve of optical system

点扩散函数可以计算由物方某一点光源发出由一个光学系统所成的衍射像的强度分布,由图 11 可以看出,相对于旁瓣主瓣具有足够高的峰值,而且主瓣分布在探测器喇叭口大小范围内系统接收到了绝

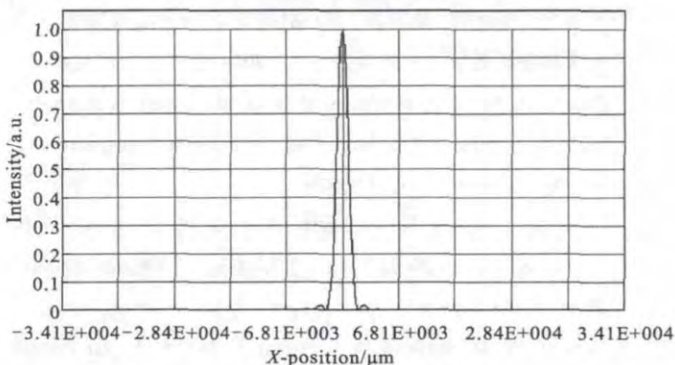


图 11 系统点扩散函数曲线

Fig.11 PSF curve of optical system

大部分的能量。

通过对上述设计光学系统的像质的分析可以看出,该系统成像质量良好,可以满足太赫兹波段成像的设计要求。

4 结 论

利用 ZEMAX 软件新设计的离轴抛物面镜像面扫描太赫兹成像系统可以快速传递图像,反射成像系统的 F 数为 2.93,通光孔径为 100 mm,视场为 $\pm 1^\circ$,焦距为 293.45 mm,成像窗尺寸设计 64×64 mm,当重构 64×64 像素的图像时,空间分辨率为 1 cm,使用 CAD 新设计的旋转多孔圆盘压缩测量,舍弃传统的逐点扫描成像,直接进行像素数确定次数测量,再通过正则归一化重构算法得到目标图像,系统难度较低、结构紧凑、体积小、重量轻、使用方便、耗能耗材少、性能稳定、寿命长、可集成化、可批量生产、成本低廉等,易于实现模块化,可以进行实时快速分析,具有现场应用价值。

参考文献:

- [1] Li Qi, Hu Jiaqi, Yang Yongfa. 2D reconstructed-image restoration of terahertz Gabor in-line digital holography [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2189–2195. (in Chinese)
李琦, 胡佳琦, 杨永发. 太赫兹 Gabor 同轴数字全息二维再现像复原[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8): 2189–2195.
- [2] Li Hongguang, Yang Hongru, Xue Zhanli, et al. Terahertz radiation detection of low temperature blackbody based on narrowband spectral filter method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 21(6): 1411–1416. (in Chinese)

- 李宏光, 杨鸿儒, 薛战理, 等. 窄带光谱滤光法探测低温黑体太赫兹辐射[J]. 光学 精密工程, 2014, 21(6): 1411–1416.
- [3] Takhar D, Laska J N, Wakin M B, et al. A new compressive imaging camera architecture using optical-domain compression [C]//SPIE, 2006, 6065: 606509.
- [4] Chan W L, Chen H T, Taylor A J, et al. A spatial light modulator for terahertz beams [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(21): 213511.
- [5] Duncan W D, Schwall R E, Irwin K D, et al. An optical system for body imaging from a distance using near-terahertz frequencies[J]. *J Low Temp Phys*, 2008, 151: 777–783.
- [6] Liu Ying, Pan Yulong, Wang Xuejin, et al. Design of imaging system with harmonic diffraction element in terahertz multi band [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(11): 2065–2071. (in Chinese)
- 刘英, 潘玉龙, 王学进, 等. 谐衍射/折射太赫兹多波段成像系统设计[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(11): 2065–2071.
- [7] Liu Hui, Li Xinglong, Pei Yuntian, et al. Design of off-axis three-mirror optical system [J]. *Laster and Optoelectronics Process*, 2008, 45(12): 59–63. (in Chinese)
- 刘辉, 李兴隆, 裴云天, 等. 离轴三反射式光学系统的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(12): 59–63.