

大视场太赫兹光学成像系统设计

陈小钢, 黄幼萍*, 黄淑燕, 陈冬英, 张昊**

福建江夏学院电子信息科学学院数字福建物联网智能家居信息采集与处理实验室, 福建 福州 350108

摘要 太赫兹 (THz) 波具有较高的透过性和时空分辨率等特性, 在空间观测领域具有广阔的应用前景。相比于扫描成像, 凝视成像具有成像性能高、速度快、结构简单等优点, 而大视场成像是凝视型光学系统所必需的。因此, 设计大视场凝视型 THz 光学系统具有重要的工程应用价值。采用反远距结构, 利用 Zemax 设计了一款相对孔径为 1、全视场角为 60° 的大视场 THz 光学成像系统。该系统采用 4 片式反远距共轴结构, 由 2 片球面透镜和 2 片非球面透镜组成, 同时透镜材料采用聚甲基戊烯 (TPX) 材料, 整个系统具有结构紧凑、质量轻等优点。优化结果显示, 各视场内的弥散斑均方根半径均小于艾里斑半径, 在空间频率为 12.5 lp/mm 处全视场的调制传递函数 (MTF) 值高于 0.3, 表明该系统具有良好的成像质量。此外, 公差分析结果表明, 该系统具有较好的稳健性, 加工工艺水准易于实现, 符合设计要求。本设计对于 THz 空间大视场高分辨探测具有重要参考价值。

关键词 成像系统; 光学设计; 太赫兹; 大视场; 公差分析

中图分类号 O439 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222058

Design of Terahertz Optical Imaging System with Large Field-of-View

Chen Xiaogang, Huang Youping*, Huang Shuyan, Chen Dongying, Zhang Hao**

College of Electronic Information Science, The Smart Home Information Collection and Processing on Internet of Things Laboratory of Digital Fujian, Fujian Jiangxia University, Fuzhou 350108, Fujian, China

Abstract Terahertz (THz) wave has a potential application prospect in the field of space observation because of its high transmittance and spatial and temporal resolution. Large field-of-view imaging is required for staring optical systems, and compared to scanning imaging, staring imaging has the advantages of high imaging performance, quick speed, and simple structure. As a result, the design of a large field-of-view staring THz optical system has important engineering application value. Zemax and an inverse telephoto structure are used to create a large field-of-view THz optical imaging system with a relative aperture of 1 and a full field-of-view angle of 60° . The system adopts a 4-piece reverse-telephoto coaxial structure, consisting of 2 spherical lenses and 2 aspherical lenses, and the lens material is polymethylpentene (TPX) material. Compactness and lightweight are advantages of the entire system. The modulation transfer function (MTF) value of the full field-of-view at the spatial frequency of 12.5 lp/mm is higher than 0.3, and the optimization results demonstrate that the root mean square radius of the diffuse spot in each field-of-view is smaller than the Airy spot radius, demonstrating the system's high imaging quality. Additionally, the system's robustness is demonstrated by the results of the tolerance analysis, and it is simple to reach the required processing technology level. This design has significant reference value for THz space large field-of-view high-resolution detection.

Key words imaging systems; optical design; Terahertz; large field-of-view; tolerance analysis

1 引言

太赫兹 (THz) 波在长波段与毫米波重合, 在短波

段与红外重合, 属于远红外和亚毫米波范畴。由于其所处的特殊位置, THz 波具有一系列独特性质, 已经被广泛地运用于生物医学、安全检测、材料研究、空间

收稿日期: 2022-07-13; 修回日期: 2022-08-17; 录用日期: 2022-08-29

基金项目: 福建省自然科学基金 (2020J05063, 2021J011224, 2021J011225)、福建省中青年教师教育科研项目 (JAT200361)、福建江夏学院国家自然科学基金培育项目 (JXZ2020004)、福建江夏学院校级科研人才培育项目 (JXZ2021009)、福建江夏学院引进人才科研启动经费项目

通信作者: *hyp@fjxu.edu.cn; **dream13027@sina.com.cn

探测、航空航天等领域^[1-5]。特别是,THz波具有强透过性、高时空分辨率、无损性和指纹谱等特性,使得THz成像相比其他成像方式更具优势。目前,国内外已研制多种THz成像系统,如用于平流层观察台上的高分辨率空间THz照相系统及用于安检的THz成像系统^[6-7]。

THz成像系统主要由THz光源、THz光学系统和THz探测器等组成,其成像方式包括扫描成像和凝视成像。扫描成像通过对样品逐点扫描,记录不同位置的透射和反射信息,最终利用各个点的信息实现物体的高分辨、高信噪比成像。但由于其扫描时间过长,不适合大样品和需要实时快速成像的系统使用。凝视成像无须对样品进行二维扫描就能直接获取整个样品的光谱信息,因而可克服逐点扫描时间过长的缺点。凝视成像对样品的光子收集效率比扫描成像高万倍以上,可实现物体高速成像,具有性能高、结构简单、体积小等优点,适用于人体安检、空间遥感等需要对大样品快速成像的场景^[8]。对比于扫描成像只要求对瞬时小视场成像,凝视成像需要光学系统在大视场内具有较好的成像质量。目前,THz成像光学系统设计视场主要集中在25°以内。例如:刘英等^[9]应用谐衍射透镜(HDE)设计了一款工作波长涵盖14~50 μm、F-number为2、视场角为2°的多波段THz光学系统;长春理工大学朱海宇等^[10]设计了一款F-number为1、视场角为11.5°的THz光学系统;电子科技大学的牟文超^[11]和闫森^[12]等设计了成像视场分别为16°和20°的THz探测阵列系统。由于成像系统的视场不够大,当探测范围较大的场合时,往往需要多个THz源和探测器配合使用。然而,分视场成像的方式要求元器件具有高度的一致性,同时需要进行图像拼接等后续处理,从而导致系统成本和复杂程度大幅增加。因此,设计一款具有更大孔径和视场的THz成像系统,实现大视场范围快速探测成像,具有重要的实际应用价值。

反远距光学系统由负-正光组组成,具有非对称结构。其中,负组可以减小轴外光线对正组的视场角,从而实现大视场成像。基于此,本文采用反远距光学结构设计了一款大孔径、大视场的透射式THz光学系统。首先,理论分析反远距结构的特性以及系统光焦度分配方法,在此基础上确定该系统结构由4片透镜组成,其中,2个非球面用于校正高级像差,进一步提高光学系成像质量,以达到设计要求。该光学系统的相对孔径为1、视场角达到60°,在25~35 μm THz波段内表现出良好的成像质量,可满足空间探测THz成像系统要求。最后对光学系统进行公差分析,分析结果表明该系统设计合理,满足批量加工的工艺水平。所设计的THz探测光学系统具有大孔径、大视场、宽光谱等特点,同时将此系统的波段延伸至百微米时系统成像质量依旧较好,极大拓展了THz探测成像的功能和应用领域范围,具有广泛的应用前景。

2 光学系统设计思想

2.1 设计指标

大视场THz成像系统在安防检测、航空探测、天文观测等领域具有广阔的应用前景,特别是对空基目标的识别与探测具有重要意义。目前,应用于空基望远镜系统、天文观测平台、航空遥感探测等系统上的THz波段主要集中在十几微米到几十微米间^[13-15]。因此,所设计的THz光学系统的工作波段设为25~35 μm,以匹配空间相机等使用场景。典型的非制冷焦平面阵列(FPA)像元数有240×320个,像元尺寸在0.03~0.05 mm之间。当像元尺寸为0.04 mm时,则对应的系统像面大小为

$$y' = \sqrt{(240 \times 0.04)^2 + (320 \times 0.04)^2} = 16 \text{ mm}。 (1)$$

光学系统的F-number与系统相对孔径(D/f')互为倒数,由系统的通光孔径(D)和焦距(f')决定,代表着系统通光能力和光学传递能力。由于THz系统信号较弱,为了能够有效地收集THz能量,需要光学系统的孔径较大,即F-number越小越好,但F-number越小,系统的像差校正难度越大。另外,从系统分辨率上考虑,为了充分利用探测器分辨率,像面上能够分辨开的两点间的最小距离应小于像元尺寸的大小^[16],即

$$\Delta y = 1.22\lambda \frac{f'}{D} = 1.22\lambda \cdot F < \sigma, (2)$$

式中: σ 为像元尺寸,取40 μm; λ 为系统中心波长,取30 μm; F 指F-number。因此,计算得到的 F 小于1.1。综合考量下,本设计F-number取1。

此外,系统分辨率极限受限于镜头的光学分辨率和探测器的分辨率,由于光学分辨率远大于探测器分辨率,因此在设计时只要考虑探测器能分辨的最大频率即奈奎斯特频率。根据奈奎斯特极限频率可知,为了充分利用探测器的分辨率,同时又不发生混频现象使图像失真,所设计的镜头与探测器须满足采样定理:采样频率大于等于2倍信号频率,即极限状态下,1个像点至少成像到2个像元上,因此系统空间截止频率(f_N)由下式给出:

$$f_N = \frac{1}{2\sigma} = \frac{1}{2 \times 0.04} = 12.5 \text{ lp/mm}。 (3)$$

同时,为了使探测范围更大,本设计要求全视场 2ω 为60°,具体设计指标如表1所示。

表1 光学系统的设计指标

Table 1 Design specifications of optical system

Parameter type	Value
Working waveband /μm	25-35
F-number	1
Field-of-view / (°)	60
Detector pixel (W×H)	320×240
Image size /mm	16

2.2 初始结构分析

THz 光学系统的结构主要有反射式、透射式以及折反射式。与反射式和折射式结构相比,透射式结构较为简单,且易装调,容易满足大孔径和大视场的要求。同时考虑到反远距结构的视场较大,且其后工作距离比焦距长,方便在探测器前加保护玻璃,故本设计首选反远距的透射式结构作为初始结构,如图 1 所示。其中, G_1 为负光组, G_2 为正光组, O_1 和 O_2 分别为两个光组的主点, H' 为等效系统的像方主点, l_1' 为前光组像距, l_2 和 l_2' 分别为后光组的物距和像距, d 为两光组主面间距, h_1 和 h_2 分别为光线在主面上的投射高度。反远距结构是由负、正光组以一定间隔分离组成的,负光焦度的光组在前,正光焦度的光组在后,这种结构使像方主面往后移,从而使后工作距离 l_2' (第 2 个光组的像距)大于系统焦距 f' ,有利于在系统后面放置其他光学元件,尤其适合在短焦距系统中使用。

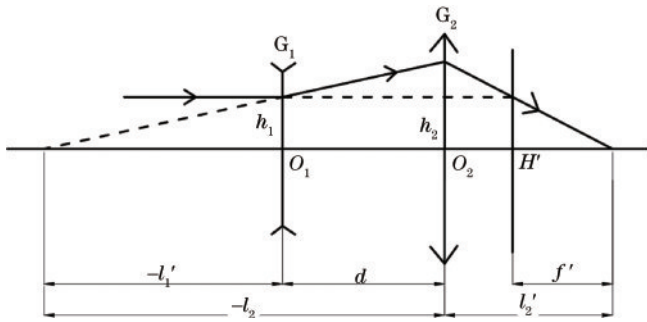


图 1 反远距结构原理图

Fig. 1 Schematic diagram of inverse telephoto structure

假设光学系统的光焦度为 Φ ,前组透镜的光焦度为 Φ_1 ,后组透镜的光焦度为 Φ_2 ,前组和后组之间的间隔为 d ,光线在前、后组上的投射高度分别为 h_1 和 h_2 ,取归一化后的光焦度 Φ 和投射高度 h_1 为 1,则系统的光焦度满足:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - d\Phi_1\Phi_2, \quad (4)$$

$$l_2' = h_2 = h_1 - d\Phi_1. \quad (5)$$

由图 1 中的几何关系可知,系统的光学总长 L 为

$$L = d + l_2'. \quad (6)$$

对于理想光学系统而言,系统的焦距 f' 与视场角和像高存在以下关系:

$$f' = y' / \tan \omega, \quad (7)$$

式中; y' 为半像高; ω 为半视场角。根据式(7)可计算出,系统的焦距理论值为 14 mm,为使系统能够较为紧凑,将总长控制在 10 倍焦距以内,根据式(6)归一化后的 $L < 10$ 。令 l_2' 为 2 mm,则 $d < 8$,结合式(4)~(5),前、后组光焦度 Φ_1 和 Φ_2 在不同 d 值下的分布情况如图 2 所示。通常,透镜组的光焦度越大所产生的像差也越大,校正难度也越大,因此,光焦度的取值不宜过大^[17]。从图 2 可以看出, Φ_1 和 Φ_2 随间隔 d 的增大而减小,而 d 的增大也会使系统的轴向尺寸变长,因而 d 不

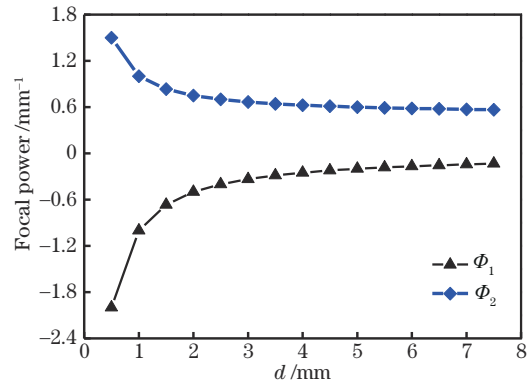


图 2 光焦度分布情况

Fig. 2 Distribution of focal power

能无限大。当 d 大于 4 时, Φ_1 和 Φ_2 的变化较为平缓,且考虑到实际透镜具有一定的厚度,为使系统的总长不至于过长,取 $d = 4$ mm,则 $\Phi_1 = -0.25$, $\Phi_2 = 0.625$ 。将系统焦距放大到 14 mm,相应的 $\Phi_1 = -0.0179$, $\Phi_2 = 0.0446$ 。前组的光焦度较小,可选用一片弯月负透镜即可,而后组的光焦度较大,需要采用更为复杂的后组结构来校正大视场像差,以保证系统的成像质量,因此采用 3 片透镜进行后组设计。

2.3 材料的选取

目前,运用于 THz 波段的材料较少,主要包括高阻硅(HRFZ-Si)和部分有机材料,其中,有机材料包括聚甲基戊烯(TPX)、聚乙烯(PE)、聚四氟乙烯(PTFE)。高阻硅是最常用的 THz 材料,该材料的折射率高达 3.42,在光焦度一定时,透镜表面的入射光线不会因曲率半径的改变而发生大幅度偏折,有利于像差的校正。然而,高阻硅的反射损耗较大,且材料成本较高,材质较重。相比之下,有机材料作为新型 THz 材料,具有轻便、廉价、易成型、低反射率等特点,可以进一步降低 THz 系统成本,拓展其应用领域。有机材料里面又以 TPX 的性能最为优异。与高阻硅相比,TPX 折射率约为 1.46,远小于高阻硅的折射率,其表面反射损耗较小。另一方面,TPX 材料在可见光到 THz 波段范围内具有良好的透明度,可直接采用可见光对光学系统进行准直,并通过肉眼进行观察,极大降低了装调的难度,而高阻硅的适用波长主要在 1.2 μm 以上,装调过程较为复杂。同时,TPX 还具有较小的色散和良好的注塑性能,可通过注塑成型来制作透镜,进行批量生产,使得加工成本更低、效率更高。此外,TPX 材料是所有聚合物中最轻的,密度比高阻硅小得多,有利于光学系统的轻量化。因此,本系统透镜材料选用 TPX 材料,在有效减小宽光谱范围内的色差情况下,进一步降低成本和实现系统轻量化。

2.4 设计过程

由于 Zemax 软件中没有 TPX 材料,为了更加准确地对系统进行仿真,需要在玻璃库里建立 TPX 材料。光学塑料的折射率 n 与波长 λ 之间的关系,可以采用

Schott 函数来计算^[18],即

$$n^2(\lambda) = a_0 + a_1\lambda^2 + a_2\lambda^{-2} + a_3\lambda^{-4} + a_4\lambda^{-6} + a_5\lambda^{-8}, \quad (8)$$

式中: $a_0 \sim a_5$ 为拟合系数。将表 2 中 TPX 折射率数据输入 Zemax 中进行参数拟合,得到最终的拟合参数,如图 3 所示。将 Schott 拟合函数曲线与 TPX 材料折射率数据点对比可以看出,Zemax 中 TPX 材料折射率拟合函数与实际情况基本符合。

表 2 TPX 折射率分布及拟合参数

Table 2 Refractive index distribution and fitting parameters of TPX

$\lambda / \mu\text{m}$	n	Schott fitting parameter	Value
24	1.4568	a_0	2.13222183
60	1.4559	a_1	$1.77417878 \times 10^{-9}$
300	1.46	a_2	-6.72231997
667	1.46	a_3	$4.68816822 \times 10^{-2}$
1000	1.465	a_4	0.14676434
3191	1.466	a_5	$3.66331735 \times 10^{-1}$

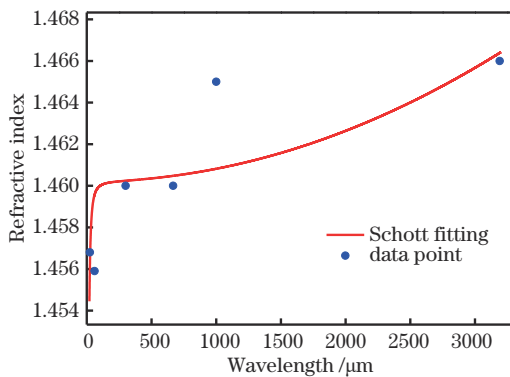


图 3 TPX 折射率拟合曲线分布图

Fig. 3 Fitting curve distribution of TPX refractive index

在建立玻璃库的基础上,对初始结构进行分析,选择图 4(a)中的反远距结构作为初始结构,将初始结构

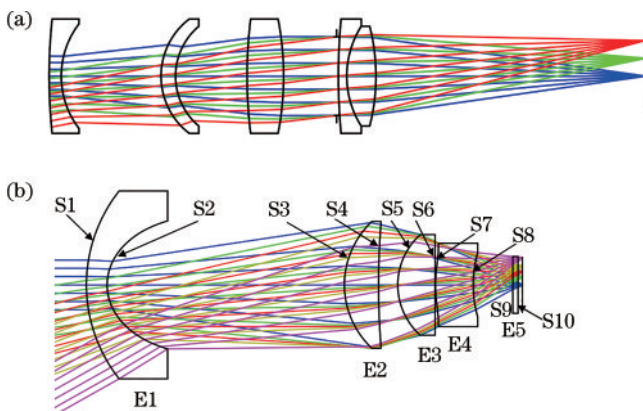


图 4 系统和光路图。(a)系统初始结构;(b)系统最终光路图

Fig. 4 Initial system structure and optical path diagram.

(a) Initial structure; (b) final optical path diagram of system

的参数输入 Zemax 中进行建模。由上述分析可知,前组仅需由 1 片负弯月透镜承担,为此去掉前组中对系统成像影响较小的第 2 片透镜,后组则由后 3 片透镜组成,并对系统进行优化,具体过程如下:

1) 在像面前加入探测器保护片,并将初始结构的焦距缩放至 14 mm,采用评价函数系统有效焦距(EFFL)控制整个系统的焦距,用平面有效焦距(EFLY)操作数分别控制前、后组的焦距。

2) 把初始结构的材料替换成 TPX 材料,将 F-number 逐渐减小至 1,半视场角增大至 30°,把前、后组透镜的曲率半径和厚度作为优化变量进行优化,并把双胶合拆分为 2 个单透镜,增加自由变量,以利于校正像差。为有效缩小后组系统的口径及减小轴外像差,将系统的孔径光阑设置在后组第 2 块透镜上。在 F-number 和视场角满足设计指标要求后,应用 Zemax 多重结构设置 1 m、2 m 和无穷远等 3 个不同的探测范围,同时对三重结构进行优化。

3) 在优化过程中,利用工作 F-number(WFNO)对系统的相对孔径进行约束,采用中心厚度大于控制后截距的长度,同时添加最小空气中心厚度(MNCA)、最小空气边缘厚度(MNEA)、最小玻璃中心厚度(MNCG)、最大玻璃中心厚度(MXCG)、最小玻璃边缘厚度(MNEG)和最大玻璃边缘厚度(MXEG)对透镜和空气的中心厚度及边缘厚度等边界条件进行约束,以保证系统的可加工性。为使系统的结构更为紧凑,还需采用从指定的第一个和最后一个表面之间的距离(TTHI)对其总长度进行限制。

4) 鉴于大视场的系统存在较大的畸变,为此后续优化不对系统的焦距作严格约束,只对前、后组的光焦度进行控制,并采用指定表面实际光线径向坐标(REAR)操作数控制各个视场的像高。

5) 通过点列图、光线特性曲线等图形分析系统的像差,利用球差(SPHA)和轴上球差(LONA)操作数控制系统的球差,使用彗差(COMA)、场曲(FCUR)、像散(ASTI)、畸变(DIST)操作数分别控制整个系统的彗差、场曲、像散和畸变。此外,使用子午场曲(FCGT)和弧矢场曲(FCGS)操作数对 0.7 视场和全视场处的子午场曲和弧矢场曲进行控制,利用在 y 方向上相对于主光线的垂轴像差(TRAY)和求和(SUMM)的组合操作数控制轴外视场全口径处的彗差。

6) 为进一步校正大口径和大视场像差以及减小透镜的厚度,可适当选用非球面进行设计。将第 1 片透镜的后表面和第 4 片透镜的前表面都设置为偶次非球面,前者可以有效校正像散和畸变,后者能减小球差。最后,采用子午调制函数(MTFT)和弧矢调制函数(MTFS)对全视场传递函数进行优化。

不断地对系统参数进行反复修改和优化,图 4(b)给出了无穷远处物体经系统成像后的最终光路图,系

统总长为 123 mm,前、后组焦距分别为 -53.32 mm 和 26.58 mm。图中 E1~E5 和 S1~S10 分别代表各元件序号和各表面序号,其中,S2 和 S7 为非球面,圆锥系数分别为 -0.443 和 5.064,最后一块平行平板为探测器保护片。

3 光学系统的性能分析

该系统的性能采用点列图、调制传递函数(MTF)曲线图、场曲/畸变图进行判定。图 5 给出了该系统的点列图,即物点经光学系统成像后在像面上所成的弥散斑情况。取 30 μm 为主波长,分别对 0 视场(0°)、0.3 视场(9°)、0.5 视场(15°)、0.7 视场(21°)以及全视场(30°)进行采样。在全视场内,弥散斑的最大均方根半径(RMS radius)为 29.273 μm,小于艾里斑半径,所有弥散斑基本被控制在艾里斑内。

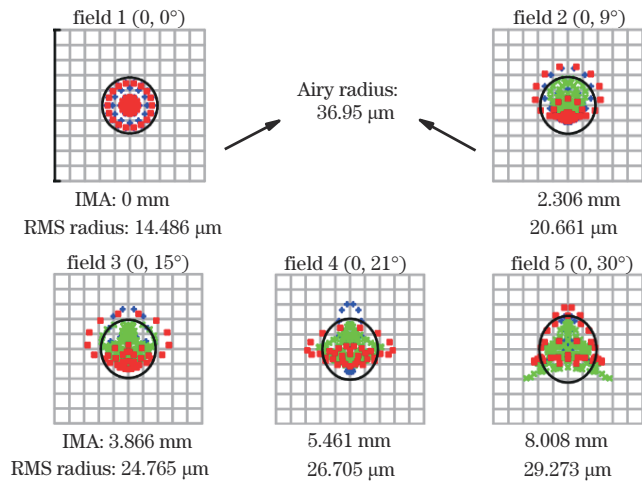


图 5 点列图(物距无穷远)

Fig. 5 Spot diagrams (infinite distance)

图 6 为所提系统的 MTF 曲线图,可以看出,在空间频率为 12.5 lp/mm 时,各视场子午和弧矢方向的 MTF 值均大于 0.3,表明系统具有较高的成像质量,符合系统要求。

由图 7 的场曲和畸变图可知,所提系统的最大场

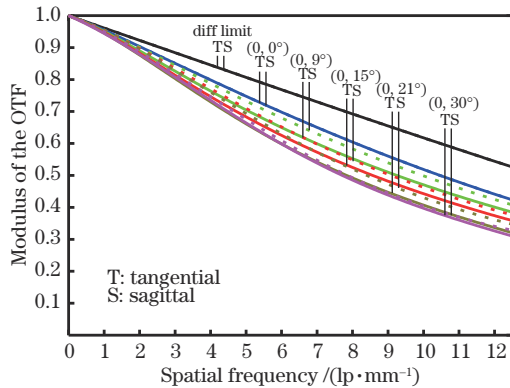


图 6 MTF 曲线

Fig. 6 MTF curve

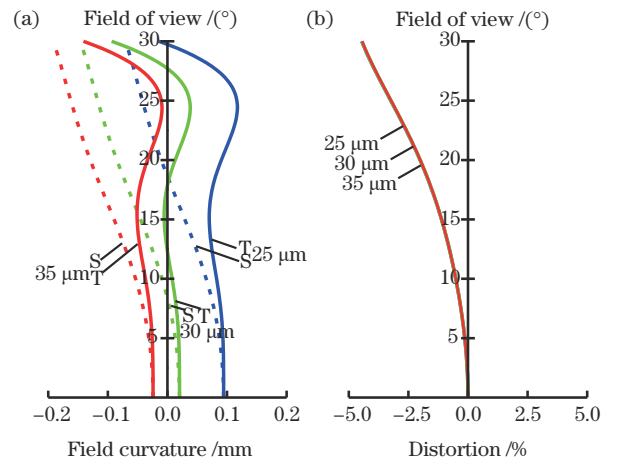


图 7 场曲和畸变。(a)场曲;(b)畸变

Fig. 7 Field curvature and distortion. (a) Field; (b) distortion

曲控制在 0.2 mm 范围内[如图 7(a)所示],畸变随着视场的增大而增加,但各视场的畸变不超过 ±5% [如图 7(b)所示]。图 8 为所提光学系统的纵向像差曲线图,系统的单色球差和轴向色差均小于 0.2 mm,表明系统的球差和色差得到了有效校正。

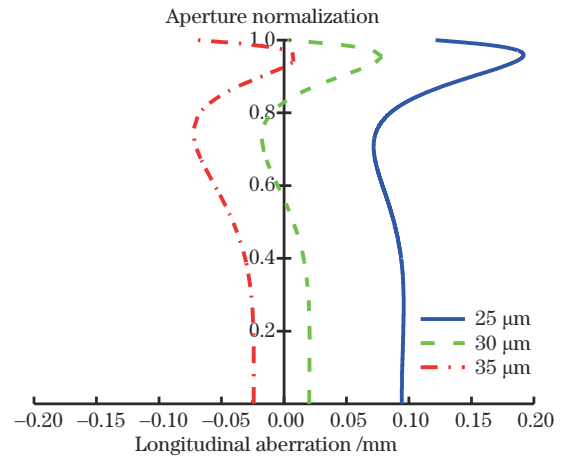


图 8 纵向像差曲线图

Fig. 8 Longitudinal aberration curve

像质分析表明,该系统具有良好的性能,成像质量符合设计要求。此外,探测器的探测范围为 [1 m, ∞),最大的调焦量为 0.2 mm。当探测范围分别在 1 m 和 2 m 以内时,其弥散斑也均控制在艾里斑之内,MTF 值皆高于 0.3,同样具有优异的成像质量。

4 光学系统的公差分析和良率评估

光学系统在实际制造过程中由于加工误差、组装误差、材料误差等因素导致成像质量较理论设计结果有所下降,因此在光学系统理论设计完后,还需要根据现代加工工艺水平,对其进行公差分析,将各种误差控制在合理的范围内,以评估最终产品的性能水平、成本和良率,并验证系统设计的可行性。其中,加工误差包括曲率半径、中心厚度、表面不规则度、表面偏心和表

面倾斜, 组装误差包括元件偏心 and 元件倾斜, 透镜的折射率则属于材料误差^[19]。

基于目前的加工工艺水平和成本考虑, 对所提光学系统进行公差分析时, 先分配较为宽松的公差值, 再根据分析结果对公差值进行修正。初始公差值设定如下: 曲率半径为 3 个光圈, 透镜厚度、空气厚度、表面偏心及元件偏心均为 0.05 mm, 表面和元件倾斜设置为 3', 折射率为 0.001, 标准球面和非球面的表面不规则度分别设为 1 个光圈和 0.2 个光圈, 并且非球面的表面不规则度采用标准泽尼克模型来分析。根据初始公差值, 采用 Zemax 光学设计软件中的灵敏度分析和蒙特卡罗分析方法, 以后截距的变化量作为补偿量, 以奈奎斯特空间频率为 12.5 lp/mm 处的 MTF 平均值作为成像质量的评价标准, 并运行 50 个蒙特卡罗模拟来评估

实际产品的 MTF 值变化情况。图 9 给出了蒙特卡罗模拟后 20 个公差操作数, 可以看出, 元件 E2~E4 (S3~S8) 的表面面型严重影响系统的成像质量, 且 MTF 值的最大下降量为 0.21。此外, 元件 E2 和 E4 的偏心、元件 E2 到 E3 的空气间隔、元件 E3 到 E4 的空气间隔也比较敏感, 因而应对初始公差值进行修正, 严格控制敏感元件的曲率半径、不规则度、偏心等误差, 以提高加工后系统的良率, 修正后的最终公差分配值如表 3 所示。根据表 3 的公差值, 再次采用灵敏度分析方法, 运行 50 个蒙特卡罗模拟, 其模拟后的 MTF 概率分布情况如图 10 所示。从图 10 可知, 各视场有 90% 以上的样本 MTF 平均值分别高于 0.311、0.292、0.275、0.265 和 0.210, 满足系统的成像质量要求, 系统具有较好的稳健性, 且加工工艺易于实现。

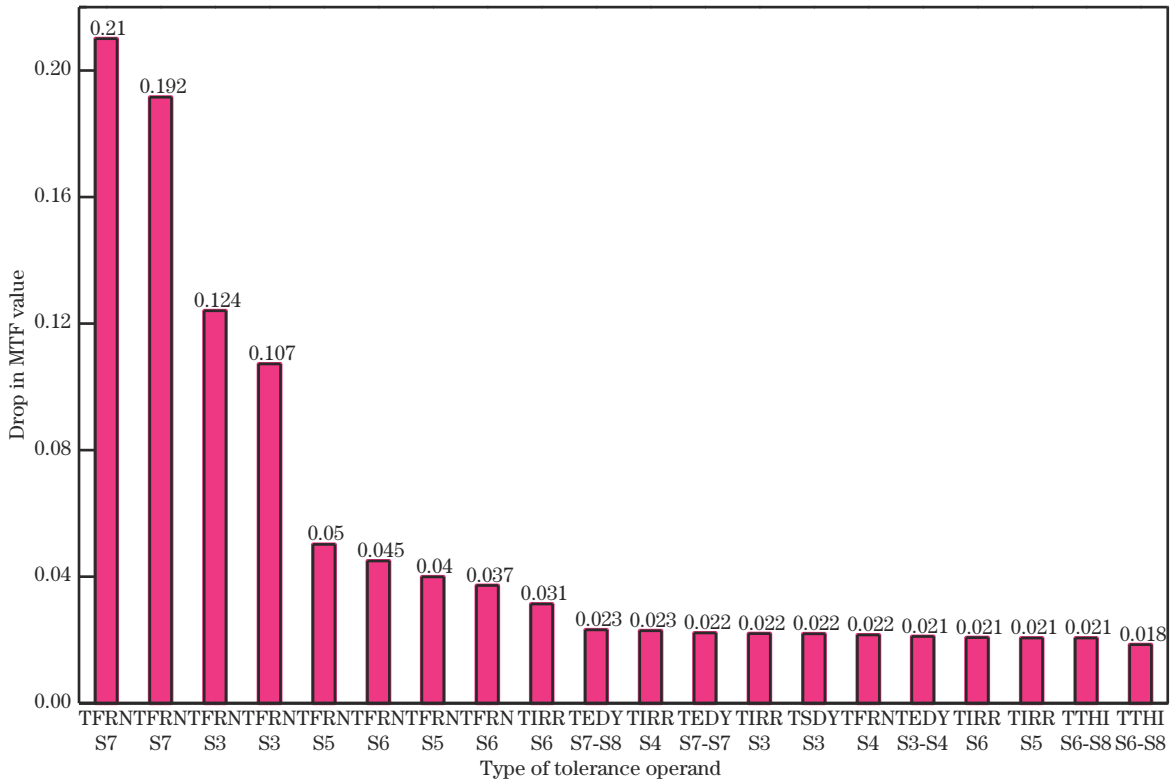


图 9 最敏感的公差操作数

Fig. 9 Most sensitive tolerance operands

表 3 光学系统的最终公差分配值

Table 3 Final tolerance allocation values for optical systems

Element/ Surface number	Radius/ Fringes	Thickness / mm	Surface eccentricity /mm	Element eccentricity /mm	Surface tilt / (')	Element tilt / (')	Irregularity/ Fringes	Index
E1	S1	3	0.05	0.05	3		1	0.001
	S2	3	0.05	0.05	3	3	0.2	
E2	S3	1	0.05	0.03	3		0.25	
	S4	2	0.04	0.05	3	3	0.5	
E3	S5	2	0.05	0.05	3		0.5	
	S6	2	0.03	0.05	3	3	0.5	

表 3 (续)

Element/ Surface number	Radius/ Fringes	Thickness / mm	Surface eccentricity /mm	Element eccentricity /mm	Surface tilt /(')	Element tilt /(')	Irregularity/ Fringes	Index
E4	S7	1	0.05	0.03		3	0.2	
	S8	3	0.05	0.05		3	1	
E5	S9	3	0.05	0.05		3	1	
	S10	3	0.05	0.05		3	1	

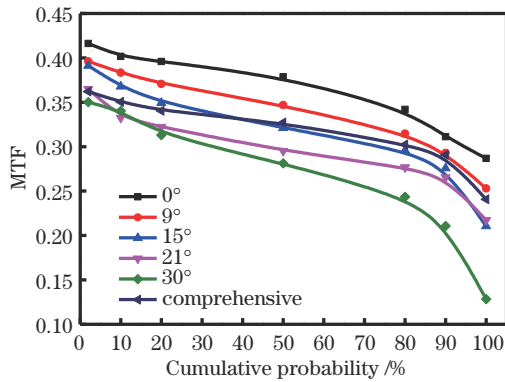


图 10 MTF 的累积概率曲线图

Fig. 10 Cumulative probability curve of MTF

5 结 论

大视场、快速、高分辨率成像是 THz 空间探测系统的重要发展方向之一。本研究基于反远距型结构,实现了全视场角为 60° 、F-number 为 1 的大视场 THz 光学系统设计,其工作波段为 $25\sim 35\ \mu\text{m}$,当将波长延伸至百微米范围时,仍有较好的成像质量。系统透镜采用 TPX 材料,可通过注塑成型得到,提高加工效率和降低成本,同时又能实现轻量化。各视场内弥散斑的均方根半径均小于艾里斑半径,在 $12.5\ \text{lp/mm}$ 处的 MTF 值均大于 0.3,场曲和畸变分别控制在 0.2 mm 和 $\pm 5\%$ 。此外,系统的加工和装配公差较为宽松,易于实现。所设计的 THz 光学成像系统具有良好的成像质量和稳健性,在医疗诊断、生物成像、空间检测等方面具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 孙一健,王继芬. 太赫兹时域光谱技术在食品、药品和环境领域中的应用研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(16): 1600003.
Sun Y J, Wang J F. Research progress of terahertz time-domain spectroscopy in food, drugs, and environment[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(16): 1600003.
- [2] Mittleman D M. Twenty years of terahertz imaging[J]. Optics Express, 2018, 26(8): 9417-9431.
- [3] 徐德刚,王与焯,胡常灏,等. 光学太赫兹辐射源及其在脑创伤检测中的应用[J]. 中国激光, 2021, 48(19): 1914002.
Xu D G, Wang Y Y, Hu C H, et al. Optical terahertz radiation sources and terahertz application in traumatic brain injury[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(19):

1914002.

- [4] 王奇书,牟达,周桐宇,等. 玻纤复合材料分层缺陷太赫兹无损检测技术[J]. 光学学报, 2021, 41(17): 1712003.
Wang Q S, Mu D, Zhou T Y, et al. Terahertz nondestructive test of delamination defects in glass-fiber-reinforced composite materials[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(17): 1712003.
- [5] 丛龙庆. 主动式太赫兹超材料器件综述[J]. 中国激光, 2021, 48(19): 1914003.
Cong L Q. Active terahertz metadevices[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(19): 1914003.
- [6] Keller L D, Herter T L, Stacey G J, et al. FORCAST: a facility 5-to 40- μm camera for SOFIA[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4014: 86-97.
- [7] 冯辉,卜伟华,王文静,等. 单探测器快速扫描被动太赫兹人体成像系统[J]. 光学学报, 2020, 40(7): 0711002.
Feng H, Bu W H, Wang W J, et al. Passive terahertz imaging system for fast scanning of human body by a single detector[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(7): 0711002.
- [8] 蔡毅,王岭雪. 红外成像技术中的 9 个问题[J]. 红外技术, 2013, 35(11): 671-682.
Cai Y, Wang L X. Nine issues associated with infrared imaging technology[J]. Infrared Technology, 2013, 35(11): 671-682.
- [9] 刘英,潘玉龙,王学进,等. 谐波衍射/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.
Liu Y, Pan Y L, Wang X J, et al. Design of imaging system with harmonic diffraction element in terahertz multi-band[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(11): 2065-2071.
- [10] 朱海宇,张鸿佳,王文生. $50\sim 100\ \mu\text{m}$ 太赫兹成像物镜设计[J]. 红外, 2014, 35(2): 17-20, 25.
Zhu H Y, Zhang H J, Wang W S. Design of $50\sim 100\ \mu\text{m}$ terahertz imaging lens[J]. Infrared, 2014, 35(2): 17-20, 25.
- [11] 牟文超. 太赫兹探测成像阵列光学组件设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2017: 24-41.
Mou W C. Design of optical components for terahertz detecting imaging array[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017: 24-41.
- [12] 闫森,王军,杨明,等. 基于 Tracepro 的太赫兹探测阵列光学镜头设计[J]. 激光与红外, 2014, 44(4): 438-442.
Yan M, Wang J, Yang M, et al. Design of optical lens for terahertz detector array using Tracepro[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(4): 438-442.
- [13] 李梅. $15\sim 38\ \mu\text{m}$ 太赫兹波成像光学系统设计研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2006: 26-36.
Li M. Design study of $15\sim 38\ \mu\text{m}$ THz spectrum wave

- band imaging optical system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2006: 26-36.
- [14] Harper D A, Allen C A, Amato M J, et al. HAWC: a far-infrared camera for SOFIA[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4014: 43-53.
- [15] 杨旭, 牟达, 陈炳旭, 等. 基于太赫兹波段的三反变焦系统设计[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2021, 44(1): 1-6.
- Yang X, Mu D, Chen B X, et al. Design of three reflective zoom system based on terahertz band[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 44(1): 1-6.
- [16] 李晓彤, 岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2003: 190-198.
- Li X T, Cen Z F. Geometry, aberration and optical design[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2003: 190-198.
- [17] 宋菲君, 陈笑, 刘畅. 近代光学系统设计概论[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 17-21.
- Song F J, Chen X, Liu C. Introduction to modern optical system design[M]. Beijing: Science Press, 2019: 17-21.
- [18] 曹恩达, 于勇, 宋长波, 等. 一种手持式太赫兹探测系统的结构及光学设计[J]. 遥测遥控, 2020, 41(2): 1-9.
- Cao E D, Yu Y, Song C B, et al. An optical and structural design of a hand-held Terahertz detection system based on ZEMAX and ProE[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2020, 41(2): 1-9.
- [19] 张健. 30-300 mm 轻型变焦物镜光学系统设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2019: 45-48.
- Zhang J. Optical system design of 30-300 mm light weight zoom objective lens[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019: 45-48.