

文章编号 1004-924X(2008)11-2065-07

# 谐衍射/折射太赫兹多波段成像系统设计

刘 英<sup>1,2</sup>, 潘玉龙<sup>3</sup>, 王学进<sup>3</sup>, 孙 强<sup>1</sup>, 卢振武<sup>1</sup>, 张红鑫<sup>1</sup>, 刘 华<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 第二炮兵工程设计研究院, 北京 100011)

**摘要:** 为了获取足够的目标信息, 同时避免宽光谱色差和结构的复杂性, 本文充分利用太赫兹波的科学价值, 建立了谐衍射/折射太赫兹多波段成像系统。针对谐衍射元件独特的色散性质, 将谐衍射透镜应用于  $14\sim 50\ \mu\text{m}$  太赫兹成像系统中, 使系统在  $15.8\sim 16.2\ \mu\text{m}$ ,  $18.5\sim 20\ \mu\text{m}$ ,  $23\sim 25\ \mu\text{m}$ ,  $30.5\sim 33.5\ \mu\text{m}$  和  $46\sim 50\ \mu\text{m}$  5 个谐振波段内的轴向像差最大为  $0.75\ \text{mm}$ 。由于各谐振波段内的放大率是波长的函数, 图像重构时将引起像元的配准误差, 利用光学二组元法设计的变焦结构成功地解决了这一问题。设计结果表明: 系统像高恒定为  $6.74\ \text{mm}$ , 变焦结构还具有很好的像差补偿作用; 在  $10\ \text{lp/mm}$  时, 光学传递函数在 5 个谐振波段内均达到衍射极限, 实现了轻小、便携、易加工的设计要求。

**关键词:** 太赫兹波; 谐衍射透镜; 多波段成像; 变焦系统; 成像系统

**中图分类号:** O439; TH703; O436.1 **文献标识码:** A

## Design of imaging system with harmonic diffraction element in terahertz multi-band

LIU Ying<sup>1,2</sup>, PAN Yu-long<sup>3</sup>, WANG Xue-jin<sup>3</sup>, SUN Qiang<sup>1</sup>, LU Zhen-wu<sup>1</sup>, ZHANG Hong-xin<sup>1</sup>, LIU Hua<sup>1</sup>

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

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *Engineering Design & Research Institute of the Second Artillery, Beijing 100011, China)*

**Abstract:** In order to get enough information, and to avoid the big chromatic aberration of wide spectrum and the complexity of optical system, a harmonic diffractive/refractive optical system was established by making the best use of science value of terahertz. A  $14\sim 50\ \mu\text{m}$  terahertz wave was integrated into multi-band imaging system based on the special large dispersion capability of harmonic diffractive element, and the longitudinal aberration was simultaneously limited to less than  $0.75\ \text{mm}$  in the five harmonic wave bands ( $15.8\sim 16.2\ \mu\text{m}$ ,  $18.5\sim 20\ \mu\text{m}$ ,  $23\sim 25\ \mu\text{m}$ ,  $30.5\sim 33.5\ \mu\text{m}$  and  $46\sim 50\ \mu\text{m}$ ). In each harmonic wave band, the magnification changed as a function of wavelength, which created image registration error. To compensate this shortcoming, a zoom optical system was designed by binary optical component. The design results show that the image height keeps  $6.74\ \text{mm}$  in every harmonic band and the zoom optical system can realize aberration compensation action. In the five

收稿日期: 2008-01-29; 修订日期: 2008-03-07.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2006AA703405G)

bands, each optical transfer function approaches to the diffraction limit in 10 lp/mm. These results indicate that the system can meet the requirements for portability, minitype and easy fabrication.

**Key words:** terahertz; harmonic diffraction lens; multi-band imaging; zoom system; imaging system

## 1 引言

太赫兹波<sup>[1-2]</sup>是一个非常有科学价值的电磁辐射区域,被誉为 21 世纪影响人类未来的 10 大技术之一。太赫兹辐射通常指的是频率在 0.1~10 THz 的电磁波,它的频率范围处于电子学与光子学的交叉区域。由于其所处的特殊位置,太赫兹波表现出一系列不同于其他电磁辐射的特殊性质:带宽很宽,能量效率比可见光或近中红外光高得多;时域频谱信噪比很高,非常适用于成像;可以探测比可见和中长波红外更远的信息,具有比微波雷达更精确的目标定位,并且有更高的分辨率和更强的保密性。这些独特的优点,使得太赫兹波在军事、天文等方面具有广阔的应用前景,特别是对天基目标的探测识别。许多国家已对太赫兹的应用给予了高度重视。目前,美国、英国、德国、法国等国家已经完成了空间太赫兹相机的研制<sup>[3-5]</sup>,为了避免宽光谱大色差,这些系统采用的是折射式或折反式结构,使得系统结构复杂、公差严格,装调十分困难。

为了获取足够的目标信息,而又能避免宽光谱色差和结构的复杂性,国外学者最早就提出了双波段成像的概念。但传统的折射系统在横跨多个波段的光谱范围时要校正好系统的轴向色差和球差,必须依靠负透镜或使用特殊色散的稀有材料来设计系统,这样的系统往往体积大、分辨率低。1995 年 Sweeney, Sommargren, Faklis 和 Morris 等人<sup>[6]</sup>分别提出了谐衍射透镜(HDE)的概念,它可以在一系列分离波长处获得相同的光焦度,可用在多光谱、宽视场及大数值孔径的光学成像系统中。

本文利用 HDE 的特性,讨论了含有 HDE 的多波段光学系统设计的可行性,并从变焦光学系统<sup>[7-8]</sup>的理论出发,设计了放大率补偿系统,弥补了多波段成像过程中的缺点,并给出了设计公式和具体设计实例。混合光学系统在 15.8~16.2  $\mu\text{m}$ , 18.5~20  $\mu\text{m}$ , 23~25  $\mu\text{m}$ , 30.5~33.5  $\mu\text{m}$  和 46~50  $\mu\text{m}$  5 个谐振波段具有较大视场,成像

质量接近衍射极限,满足多波段成像要求。而且,该光学系统具有体积小、结构简单、精度和分辨率高的优点。

## 2 谐衍射元件理论与色散原理

在谐衍射多波段成像方法中,谐衍射透镜同普通透镜一样会聚入射光线,但它不是根据折射原理而是衍射原理<sup>[8-9]</sup>。由于衍射作用,透镜产生色差的有效焦距同波长成反比:

$$f_{m,\lambda} = \frac{p\lambda_0}{m\lambda} f_0, \quad (1)$$

其中, $p$  为相位匹配因子,取整数,代表最大位相调制( $2\pi$ )整数倍( $p \geq 2$ ); $\lambda_0$  为设计波长; $f_0$  为设计波长的焦距; $m$  为衍射级次; $f_{m,\lambda}$  为任意波长  $\lambda$  处的焦距。

与普通的衍射透镜相比较,其环带间光程差为  $p\lambda_0$ ,相当于设计波长为  $p\lambda_0$ ,焦距为  $f_0$  的特殊衍射透镜,这就是 HDE。

如果要求  $f_{m,\lambda}$  与设计焦距  $f_0$  重合,即应满足:

$$\lambda m = p\lambda_0, \quad (2)$$

这就说明对于 HDE,凡波长满足式(2)的整数  $m$  所对应的波长均将会聚到共同的焦点  $f_0$  处,并把具有不同衍射级次但有相同焦距的各光波波长称为谐振波长。

在各个谐振波段内波长依赖关系满足式(1),将式(1)代入衍射一级透镜公式则有:

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f}, \quad (3)$$

$$s_i(\lambda) = \frac{f s_o}{s_o - f} = \frac{p\lambda_0 f_0 s_o}{m\lambda s_o - p\lambda_0 f_0}, \quad (4)$$

其中, $s_o$  和  $s_i$  分别为物距和像距。

由式(4)可知,谐衍射透镜用于成像时,各谐振波段内沿光轴方向的像距依赖于波长,当已知  $s_o$  和  $s_i$  时,求出波长  $\lambda$ ,根据这一原理可设计在不同谐振波段同时探测目标的太赫兹多波段探测仪器:

$$\lambda = \frac{p\lambda_0 f_0}{m} \left( \frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} \right), \quad (5)$$

当材料的折射率为  $n$  时,普通衍射面和谐衍射面的最大位相深度分别为:

$$\begin{cases} h_{1\max} = \frac{\lambda_0}{n-1} \\ h_{2\max} = \frac{p\lambda_0}{n-1} \end{cases}, \quad (6)$$

由式(6)可知,谐衍射面的最大位相深度  $h_{2\max}$  是普通衍射面的最大位相深度  $h_{1\max}$  的  $p$  倍,降低了器件加工的难度。

总之,谐衍射透镜为光学设计提供了一种全新的器件,其单色像差与普通衍射透镜类似,色散特性介于折射透镜与衍射透镜之间,降低了对工艺水平的要求,可用在多光谱、宽视场及大数值孔径的光学成像系统中,便于高质量成像,具有重要的应用价值。

### 3 变焦光学系统设计

在谐衍射多波段成像系统中,谐衍射元件在各谐振波段内,波长的横向放大率为:

$$m_{\text{HDE}}(\lambda) = \frac{s_{\text{IHDE}}(\lambda)}{s_o}, \quad (7)$$

其中,  $s_{\text{IHDE}}(\lambda)$  和  $s_o$  分别为像距和物距。由式(7)可看出系统放大率是波长的函数,这将引起不同波长光谱图像像元配准误差,得到不精确的相对光谱信号,从而限制了图像重建算法的精度。为了弥补这一缺陷,本文讨论利用光学二组元法<sup>[10]</sup>设计的变焦系统来使系统的放大率保持恒定。

在谐衍射多波段成像系统中,设变焦系统由 3 片薄透镜构成,如图 1 所示。将其认为是光学二组元系统,第一片透镜作为固定组,为光学二组元系统中的第一组元,放大率为  $M_1$ ;第二片透镜与第三片透镜组合成为第二光学组元,放大率分别为  $M_2$ 、 $M_3$ ,组合放大率为  $M_{23}$ ,物与像的距离为  $T_{23}$ ,光焦度为  $K_{23}$ ,且第三片透镜为谐衍射透镜。整个系统的放大率为  $M'$ ,且为定值。

在图 1 中,  $U_1 = 0$  表示物在无穷远处,  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  分别为薄透镜 1、2、3 的光角度;  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$  分别为薄透镜 1、2、3 相互间的距离;  $L$  是薄透镜 1 到像面的距离,在运动过程中保持不变,以保证像面的稳定;  $O_1'$  是物体经薄透镜 1 后的像点,即第二光学组元的物点;  $O_3'$  是第二光学组元的像点,也是整个系统的像点。

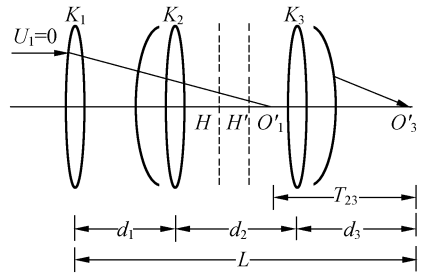


图 1 含谐衍射元件的 3 片透镜型变焦光学系统图  
Fig. 1 Three-component zoom optical system with harmonic diffraction element

通过物像关系和几何关系的综合应用,可推得:

$$M_1 = \text{常量}, M = \text{常量},$$

$$M_3 = m_{\text{HDE}}(\lambda), \quad (8)$$

$$M_{23} = M/M_1 = M_2 M_3 = \text{常量},$$

当波长  $\lambda$  一定时,  $M_3$  为定值,  $M_2$  为定值,则可求得该波长下的  $d_2$ :

$$d_2 = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (9)$$

其中:

$$a = K_2 K_3,$$

$$b = -T_{23} K_2 K_3,$$

$$c = T_{23} (K_2 + K_3) - (2 - M_{23} - 1/M_{23}),$$

$$T_{23} = (2 - M_2 - 1/M_2) F_2 + (2 - M_3 - 1/M_3) F_3,$$

从而可求出  $d_3$ :

$$d_3 = (1 - M_{23})/K_{23} - K_2 d_2 / K_{23}, \quad (10)$$

其中:

$$K_{23} = K_2 + K_3 - d_2 K_2 K_3,$$

而且:

$$L = d_1 + d_2 + d_3 = \text{常数}, \quad (11)$$

因此,对于任意波长  $\lambda$  都能找到一组  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$  值,使系统在该波长处的放大率与系统设定的放大率相同,从而达到系统的放大率恒定的目的。

### 4 具体的设计实例与分析

#### 4.1 谐振波段的选择

根据式(2),取  $p = 2$ ,  $\lambda_0 = 48 \mu\text{m}$  为设计波长,则在太赫兹波段  $14 \sim 50 \mu\text{m}$ ,谐振波长分别为

48、32、24、19.2、16  $\mu\text{m}$ , 对应衍射级次分别为  $m=2, 3, 4, 5, 6$ , 用 MATLAB 数学软件计算了各个谐振波长处的衍射效率, 如图 2 所示。考虑到衍射效率对成像质量的影响, 可利用各谐振级次覆盖的衍射效率  $>80\%$  的频谱区作为所设计的太赫兹系统的波长范围, 取 15.8~16.2  $\mu\text{m}$ , 18.5~20  $\mu\text{m}$ , 23~25  $\mu\text{m}$ , 30.5~33.5  $\mu\text{m}$  和 46~50  $\mu\text{m}$  5 个谐振波段为工作波段。

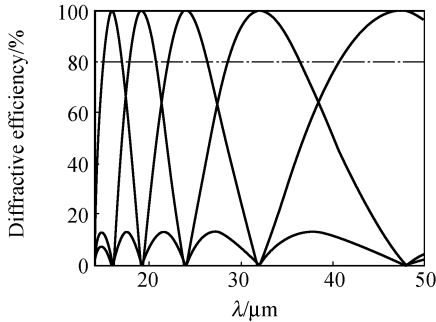


图 2  $p=2$  时 HDE 不同级次的衍射效率

Fig. 2 Diffraction efficiency of HDE when  $p=2$

#### 4.2 设计实例及分析

根据具体的需要, 确定了谐衍射多波段成像系统的初始结构, 利用光学设计软件 (ZEMAX) 的计算能力, 对该系统进行优化。特别是注意系统的不动透镜和变倍正透镜及补偿负透镜的轴向移动距离和光波长变化的关系, 不能有重叠相交或负距离的产生。当这个系统工作时, 光束通过整个系统后, 5 个谐振波段的光波分别在像平面上成像, 然后再利用 ZEMAX 软件的多重结构重新进行优化, 使系统在 5 个谐振波段内均能很好地消像差。当系统中的运动组元分别在轴上有控制移动时, 谐振波段中的各波长光线分别在像面上成清晰像。然后, 再通过计算机进行图像重构处理, 以消除临近模糊和增强像质, 从而同时收集 5 个波段的太赫兹波谱信息。

谐衍射多波段成像系统的具体参数为: 系统的总长为 274 mm, 主设计波长为 48  $\mu\text{m}$ , 相位匹配因子为  $p=2$ , 入瞳直径为 100 mm, 视场角为  $2^\circ$ ,  $F$  数为 2, 在各谐振波段系统的像高均为 6.74 mm。系统的光路如图 3 所示, 图中普通的折射

透镜作为固定组, 光阑密结于其前表面, 并在其后表面加非球面, 用于消系统球差; 补偿负透镜其前表面加谐衍射面, 由于谐衍射透镜的初级像差系数与光阑的相对位置有关, 因此在镜片移动过程中, 对各谐振波段均能达到消像差的目的。

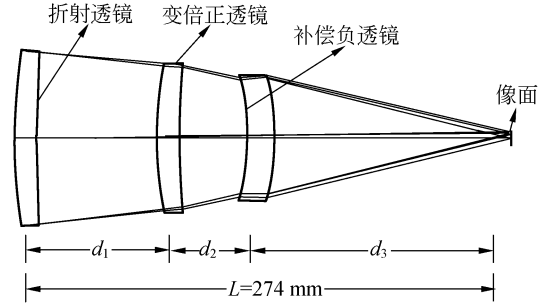


图 3 系统的光路图

Fig. 3 Layout of optical path

利用光学设计软件 (ZEMAX) 的计算能力, 确定了多重结构最终参数, 如表 1 所示。图 4 给出运动组元的位置随波长的改变而变化的模拟曲线。从图 4 可看到运动组元的移动平滑、无拐点, 使系统具有像面稳定, 结构简单的特点。

表 1 在各谐振波段内透镜间的距离

Tab. 1 Distance between lenses in each harmonic waveband

| 多重结构                   | Conf 1 | Conf 2 | Conf 3 | Conf 4 | Conf 5 |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 谐振波长 ( $\mu\text{m}$ ) | 48     | 32     | 24     | 19.2   | 16     |
| 衍射级次                   | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
| $d_1$ (mm)             | 64.82  | 82.66  | 91.58  | 96.93  | 100.5  |
| $d_2$ (mm)             | 40.25  | 29.83  | 24.61  | 24.44  | 19.4   |
| $d_3$ (mm)             | 129.3  | 114.65 | 117.1  | 114.62 | 113.1  |

图 5 为系统的轴向像差曲线图, 从图中可以看出光学系统在 15.8~16.2  $\mu\text{m}$ , 18.5~20  $\mu\text{m}$ , 23~25  $\mu\text{m}$ , 30.5~33.5  $\mu\text{m}$  和 46~50  $\mu\text{m}$  5 个

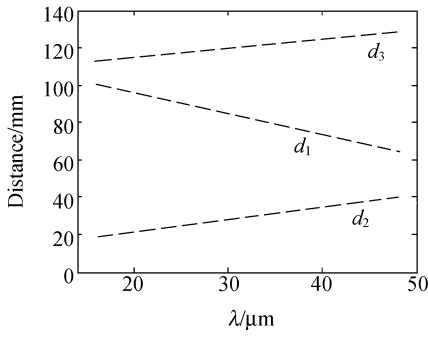
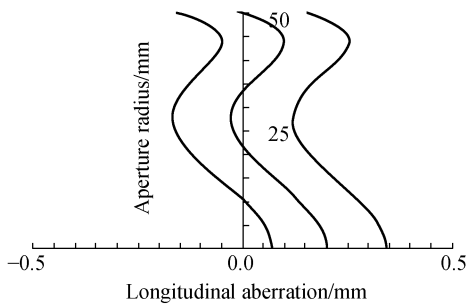
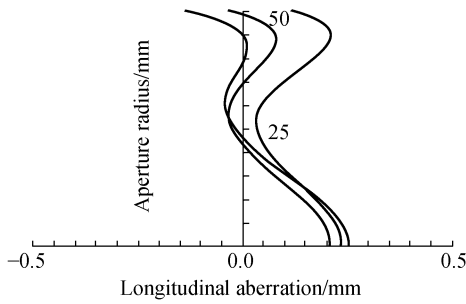


图 4 补偿系统中运动元件随各谐振波段内波长变化而移动的曲线

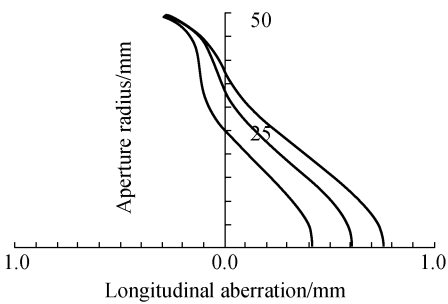
Fig. 4 Moving distances of moving elements of compensating system in each harmonic waveband



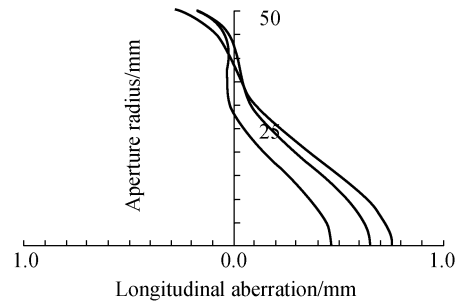
(a) 15.8~16.2  $\mu\text{m}$



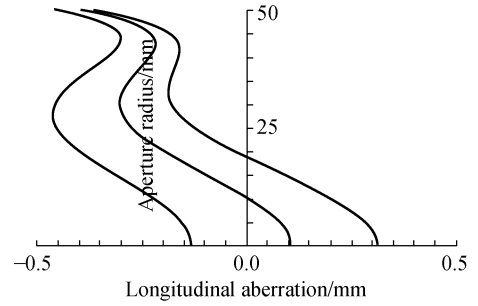
(b) 18.5~20.0  $\mu\text{m}$



(c) 23.0~25.0  $\mu\text{m}$



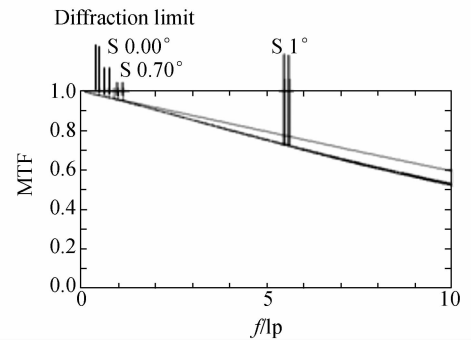
(d) 30.5~33.5  $\mu\text{m}$



(e) 46.0~50.0  $\mu\text{m}$

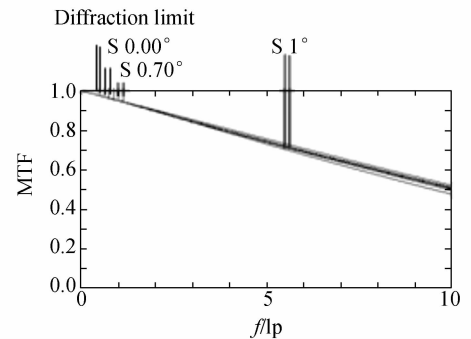
图 5 各波段的轴向像差宽度

Fig. 5 Longitudinal aberration width in each harmonic waveband



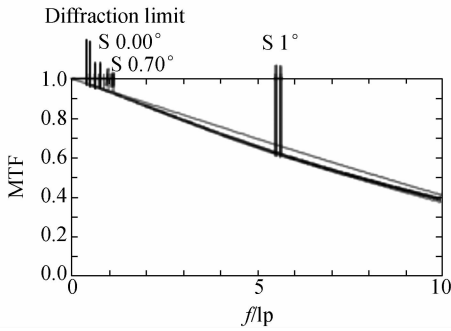
(a) 系统在 15.8~16.2  $\mu\text{m}$  的传递函数曲线

(a) MTF in 15.8~16.2  $\mu\text{m}$

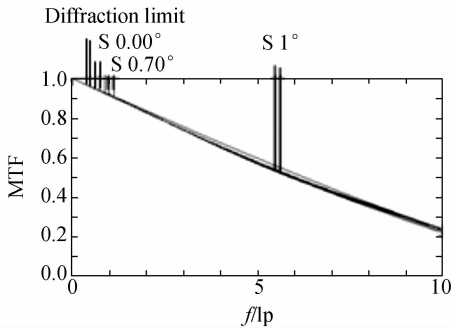


(b) 系统在 18.5~20  $\mu\text{m}$  的传递函数

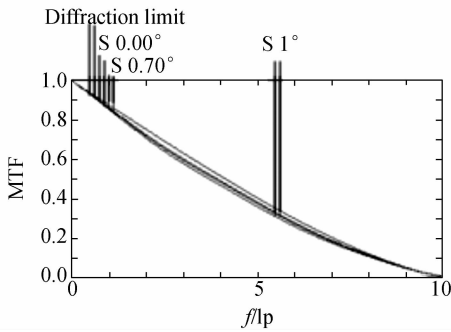
(b) MTF in 18.5~20  $\mu\text{m}$



(c) 系统在 23~25 μm 的传递函数  
(c) MTF in 23~25 μm



(d) 系统在 30.5~33.5 μm 的传递函数  
(d) MTF in 30.5~33.5 μm



(e) 系统在 46~50 μm 的传递函数  
(e) MTF in 46~50 μm

图 6 系统在各谐振波段处的传递函数曲线图  
Fig. 6 MTF in each harmonic waveband

谐振波段的轴向色差均不超过 0.75 mm, 实现了太赫兹波段宽光谱、大口径、小色差的要求。图 6 为该系统在各个谐振波段的光学传递函数曲线, 从图中可看出系统在各谐振波段内, 10 lp/mm 处对应的光学传递函数均接近衍射极限, 因此这套系统是可使用。

### 5 结 论

本文利用谐衍射性质的特性, 探讨了谐衍射元件在太赫兹多波段成像中的应用, 阐述了谐衍射元件的基本原理, 研究了多波段成像系统中变焦光学系统的设计, 解决了系统的放大率随波长改变的缺点, 并给出了具有太赫兹多波段探测能力的成像系统设计实例。设计结果表明, 此系统 5 个谐振波段内的轴向像差最大为 0.75 mm, 像高恒为 6.74 mm, 不仅使图像具有丰富的信息量, 而且保证了焦平面凝视阵列探测器的配准精度和探测精度, 便于实现高精度的精密探测。系统结构设计简单, 片数少, 具有很好的宽波段像差校正特性。

太赫兹波作为一个全新的波段, 在军事方面有着广阔的应用前景, 但必须要解决宽光谱大色差及放大率变化的难题。而高质量多波段谐衍射成像系统模型的建立, 为宽光谱太赫兹波在军事、天文等方面的应用揭开新的帷幕, 特别是对天基目标的识别与探测很有意义。因此, 本文将宽波段太赫兹波与谐衍射多波段成像系统的有机结合具有重大的现实意义。

### 参考文献:

[1] ZHANG X CH. Free-space coherent broadband terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Measurement Science and Technology*, 2001, 12: 1747-1756.  
 [2] FERGUSON B, ZHANG X CH. Materials for terahertz science and technology[J]. *Nature Materials*, 2002, 1: 26-33.  
 [3] DUBREUILL D, BAUDRAND J, ABERGEL A, et al.. Optical design for the 5~28 μm NGST infrared imager of MIRI[J]. *SPIE*, 2003, 4850: 564-573.

- [4] PAMELA S D, MATTHEW R B, BRENT J B, *et al.*. Focus determination for the James Webb Telescope Instruments: A Survey of Methods[J]. *SPIE*, 2003, 265:626512(1)-626512(11).
- [5] DONALD W S, GARY E S. Harmonic diffractive lenses [J]. *Appl. Opt.*, 1995, 34:2469-2475.
- [6] FAKLIS D, MORRIS G M. Spectral properties of multiorder diffractive lenses[J]. *Appl Opt.*, 1995, 34:2462-2468.
- [7] 孙强, 卢振武, 王肇圻. 谐衍射/折射双波段系统设计[J]. 光学学报, 2004, 24(6):756-759.  
SUN Q, LU ZH W, WANG ZH Q. The dual band design of harmonic diffractive-refractive optics system [J]. *Acta. sph. sin.*, 2004, 24(6):756-759.
- [8] 孙强, 王肇圻, 刘宏波, 等. 应用于双色探测器的谐衍射/折射光学系统[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(3):317-321.  
SUN Q, WANG ZH Q, LIU H B, *et al.*. Optical system of harmonic diffractive/refractive for infrared dual-color detector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(3):317-321. (in Chinese)
- [9] 杨新军, 王肇圻, 母国光. 折/衍混合多光谱红外成像光谱仪离轴系统设计[J]. 光学精密工程, 2005, 34(4):379-383.  
YANG X J, WANG ZH Q, MU G G. Design of hybrid refractive/diffractive off-axial optical system for multispectral infrared imaging spectrometer[J]. *Opt. precision Eng.*, 2005, 34(4):379-383. (in Chinese)
- [10] 于斌, 于秉熙. 放大率恒定的二元光学超光谱成像仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2002, 22(11):1382-1386.  
YU B, YU B X. Optical design for binary optic hyperspectral imager with constant magnification[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(11):1382-1386. (in Chinese)

作者简介:刘 英(1980—),女,山东滨州人,博士,主要从事红外光学方面的研究工作。E-mail:liuy613@163.com

## ●下期预告

# 一种新颖的蝶形双驱动足直线超声电机设计及实验

李玉宝, 时运来, 赵淳生

(南京航空航天大学 精密驱动研究所, 江苏 南京 210016)

提出了一种新颖的双驱动足直线型超声电机。该电机利用联接成一体的两个振子的对称振动,在驱动足端面质点上可获得定/动子之间接触面的切向运动;利用反对称振动,可获得法向运动。同时激励振子的对称和反对称振动,在两个驱动足端面质点上可形成相同方向椭圆运动轨迹,从而驱动压在定子上的动子直线运动。然后采用了有限元方法分析了共振频率对结构参数的灵敏度,根据各灵敏度大小适当地调节了结构参数,使定子的两相共振频率基本达到一致。为了获得高速和大推力,前端盖选用硬铝材料,后端盖选用黄铜,压紧螺栓选用镀铬高强度钢材料。实验结果表明:在预压力为 70 N 下,样机的空载速度为 0.75 m/s,最大推力为 16 N,是定子重量的 22 倍。