

文章编号: 0253-2239(2008)02-0344-05

一种高性能太阳敏感器复合光学系统设计

江 洁 温志明 张广军 樊巧云

(北京航空航天大学精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要 以夫朗禾费衍射理论为基础, 结合微透镜, 设计了一种高性能的数字式太阳敏感器复合光学系统。分析了光学系统的组成, 建立了光学系统的数学模型, 设计了光学系统的焦距、孔径和微透镜参量, 并进行了成像的数值仿真。仿真结果表明, 与基于掩模的光学系统相比, 这种新型的复合光学系统成像光斑能量分布集中, 保证计算光斑中心位置的高精度, 使敏感器具有大视场和高精度的特点。

关键词 光学设计; 数字式太阳敏感器; 微透镜; 夫朗禾费衍射

中图分类号 V448.2 **文献标识码** A

High Performance Complex Optical System Design for Sun Sensor

Jiang Jie Wen Zhiming Zhang Guangjun Fan Qiaoyun

(Key Laboratory of Precision Opto-Mechatronics Technology, Ministry of Education, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract Based on the Fraunhofer diffraction theory and a microlens, a high-performance complex optical system for a digital sun sensor is designed. The structure of this optical system is analyzed and the mathematic model is established. The focus, aperture and microlens parameters of the optical system are given and the numeric simulation is carried out. The simulative results show that the energy distribution of the spot formed by the novel complex optical system is concentrated compared with a masking optical system, so the high calculational accuracy of facular centroid is guaranteed. Meanwhile, the sensor with the novel optical system possesses a large field of view and high accuracy.

Key words optical design; digital sun sensor; microlens; Fraunhofer diffraction

1 引 言

太阳敏感器是以太阳为基准方位, 用以测量太阳光线与卫星等航天器某一体轴或坐标平面之间夹角的一种姿态敏感器。数字式太阳敏感器是基于电荷耦合器(CCD)或互补金属氧化半导体(CMOS)有源图像传感器(APS)的新一代太阳敏感器, 能满足微型航天器对姿态敏感器的高精度、小型化和低功耗的要求。

数字式太阳敏感器主要由光学系统、成像系统以及后续电路系统组成。目前数字式太阳敏感器光学系统主要利用较成熟的微机电系统(MEMS)技术研制, 即在掩模板上刻蚀出小孔, 采用小孔菲涅耳衍射成像原理对太阳进行成像, 因此这些光学系统又被称为光学掩模, 一般为小孔或小孔阵列结构, 孔的形状以圆形和方形为主^[1~3]。

周锐等^[4]研究表明, 衍射光斑的大小在感光成像面上占 3 pixel×3 pixel 时, 太阳敏感器定位精度最高。从衍射理论考虑, 光学掩模上的小孔孔径越小, 衍射效应越大, 造成衍射光斑越大。而从小孔成像的原理考虑, 小孔孔径越大, 光斑也越大, 说明孔径大小与光斑大小不是一个线性比例关系, 因此无法通过单纯缩小小孔的方法来获取更小的衍射光斑。现有太阳敏感器光学系统所能提供的最小衍射光斑所对应的小孔孔径一般为 50 μm 左右, 衍射光斑大小在 10 pixel×10 pixel 左右, 很难达到理想状态, 继续缩小小孔的直径反而会加大衍射光斑。

本文设计了一种新型的太阳敏感器光学系统, 在掩模后部增加一个微透镜, 利用夫朗禾费衍射原理, 使得其形成较小的艾里光斑, 缓解实际应用中孔径大小和精度之间的矛盾。本文介绍这种基于微透

收稿日期: 2007-08-07; 收到修改稿日期: 2007-09-18

基金项目: “十一五”民用航天预研项目(C5120062104)资助课题。

作者简介: 江 洁(1973-), 女, 福建人, 博士, 副教授, 主要从事光电信息处理和光电导航等方面的研究。

E-mail: jiangjie@buaa.edu.cn

镜的太阳传感器光学系统的设计。

2 光学系统组成及数学模型建立

数字式太阳传感器复合光学系统组成及成像光路如图 1 所示。光学系统由光学掩模及微透镜组成。太阳光线(近似平行光)射到光学掩模表面,在掩模表面发生折射;经过掩模,在小孔处形成夫朗禾费衍射,在成像面上形成衍射艾里光斑。

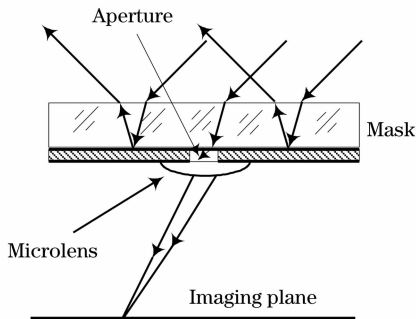


图 1 复合光学系统组成及成像光路图

Fig. 1 Composition and imaging path of the complex optical system

数字式太阳传感器复合光学系统成像机理为夫朗禾费衍射,分析斜入射情况下的衍射效应。本文仍采用标量的菲涅耳-基尔霍夫衍射公式^[5,6],数学表达式为

$$\tilde{E}(P) = \frac{1}{i\lambda} \iint_{\Sigma} \tilde{E}(Q) \frac{\exp(ikr)}{r} \frac{\cos \alpha - \cos(\pi - \theta)}{2} d\sigma, \quad (1)$$

式中 λ 为波长, r 为面元 Q 到点 P 的距离, $E(Q)$ 为面元 Q 处的复振幅, k 为玻尔兹曼常量, α 和 $(\pi - \theta)$ 分别为孔径面法线与 r 及入射光线的夹角,如图 2 所示。

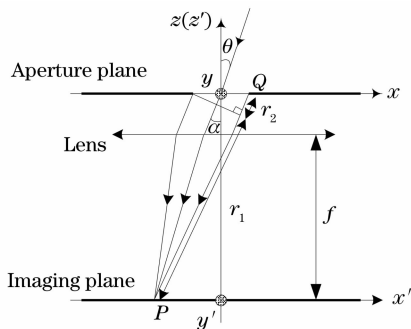


图 2 衍射模型

Fig. 2 Diffraction model

对于太阳传感器来说,入射光线为太阳光,太阳光可以视为平行光;其波前平面与小孔相交于一簇平行直线,为了计算方便,以其中过小孔圆心的直线

为 y 轴,圆心为原点,垂直于小孔面向上为 z 轴,依右手法则建立坐标系。太阳光以角度 θ 平行入射时,圆孔平面上任意一点的复振幅

$$E(Q) = E_0 \exp(-ikx \sin \theta), \quad (2)$$

以某一角度 α 衍射的平行光线经微透镜汇聚于焦平面上一点,如图 2 所示,由微透镜成像的等光程性质,以垂直于光线方向的平面截这束平行光,平面上的点到焦平面上的像点之间的光程是相等的。因此,(1)式中的 r 可以分解为两部分:等光程部分 r_1 和相差部分 r_2 ,由 $r_2 \ll r_1$,分母中 $r \approx r_1$ 。由于透镜紧贴光学掩模后部,因此 $r_1 \approx f / \cos \alpha$, f 为透镜到成像平面的距离。

代入菲涅耳-基尔霍夫衍射公式,可以得到

$$\tilde{E}(P) = \frac{E_0 \cos \alpha \exp(ikr_1) (\cos \alpha + \cos \theta)}{i2\lambda f} \times \iint_{\Sigma} \exp(-ikx \sin \theta) \exp(ikr_2) d\sigma, \quad (3)$$

(3)式为接收面的光波复振幅分布式,无法直接积分,需要采用数值积分的方法。复化辛普森(Simpson)公式^[7]计算精度较高且比较简单,本文采用这种方法。

由于计算圆孔衍射,可将(3)式化成极坐标形式:

$$\tilde{E}(P) = \frac{E_0 \cos \alpha \exp(ikr_1) (\cos \alpha + \cos \theta)}{i2\lambda f} \int_0^{2\pi} \int_0^R \xi \exp(-ik\xi \cos \omega \sin \theta) \exp(ikr_2) d\sigma, \quad (4)$$

数值积分后结果可以写成复数形式: $\tilde{E}(P) = \text{Re} + j\text{Im}$ 。则光强为

$$I(P) = \text{Re}^2 + \text{Im}^2. \quad (5)$$

3 系统参量设计

该光学系统主要参量有^[8,9]太阳传感器焦距 f 、孔径 R 以及微透镜相关参量。

3.1 太阳传感器焦距

焦距 f 主要由最大视场要求 θ_{\max} 、图像传感器感光面边长大小 S 、孔径大小 R 以及孔数 N 和孔间距 L 决定:

$$f < \frac{S - 2R - (N - 1)L}{2 \tan \theta_{\max}}, \quad (6)$$

图像传感器采用 FillFactory 公司的 STAR1000,分辨力为 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$,单个像素大小为 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$,对应视场范围为 $\pm 60^\circ$ 的情况。经过计算考虑到当入射角增大时,光斑会拉伸很长,为

了保证大角度时的精度, f 取 4 mm。

3.2 孔径

夫朗禾费衍射艾里光斑半径^[5]

$$r_0 = 1.22f_1 \frac{\lambda}{2R}, \quad (7)$$

式中 f_1 为微透镜的焦距, 近似等于太阳敏感器焦距 f , λ 取 $1 \mu\text{m}$, 由(7) 式得

$$R = \frac{0.61\lambda f_1}{r_0}, \quad (8)$$

取垂直入射时光斑大小为 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$, 将图像传感器参量代入, 得到孔径与焦距的关系是

$$R \approx 0.03f_1, \quad (9)$$

若焦距为 4 mm, 则孔径为 $120 \mu\text{m}$ 。

3.3 微透镜参量设计

仿真中微透镜采用平凸透镜, 材料选用玻璃, 折射率大约为 1.5, 如图 3。平凸透镜的焦距为^[10]:

$$f_1 = \frac{R'}{n-1}, \quad (10)$$

式中 f_1 近似等于太阳敏感器焦距 f , 取 4 mm, R' 为凸面对应的球面半径, n 为折射率。由(10) 式计算可以得到 $R' = 2 \text{ mm}$ 。

微透镜平面半径 r' 的大小原则上与孔半径相等即可, 但是微透镜边缘像差很大, 因此设计 $r' > R$, 取 $r' = 300 \mu\text{m}$ 。

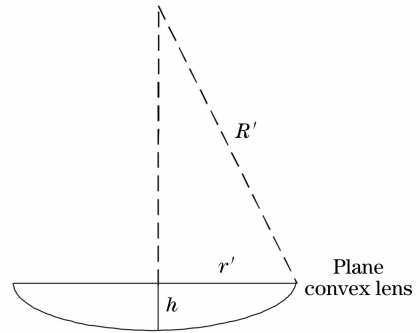


图 3 微透镜参量

Fig. 3 Parameters of the microlens

可由(11)式得到微透镜的厚度

$$h = R' - \sqrt{R'^2 - r'^2}, \quad (11)$$

将 $R' = 2 \text{ mm}$, $r' = 300 \mu\text{m}$ 代入, 得 $h = 23 \mu\text{m}$ 。

4 计算机仿真

基于微透镜的太阳敏感器光学系统参量是通过公式设计得到, 主要参量焦距 $f = 4 \text{ mm}$, 孔径 $R = 120 \mu\text{m}$, 透镜半径 $r' = 300 \mu\text{m}$, 波长为 $\lambda = 1 \mu\text{m}$ 。为了验证设计的光学系统成像效果, 在计算机上采用 VC++6.0 软件编写程序, 数值仿真成像面上的光强分布, 并分别以 0° 、 30° 和 60° 入射角为例。

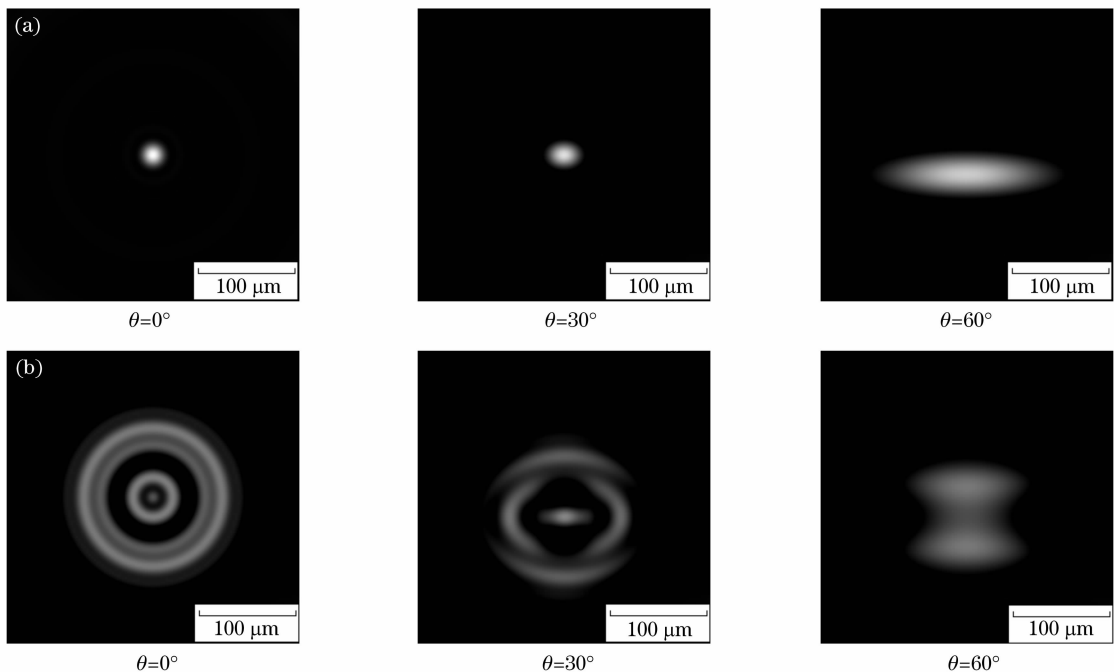


图 4 复合光学系统(a)与基于掩模的光学系统(b)二维仿真结果比较

Fig. 5 Comparison of two-dimensional simulative results between the complex optical system (a) and a masking optical system (b)

图 4 为新型光学系统与基于掩模的光学系统二维仿真结果的比较。当光线垂直入射时,新型光学系统仿真得到的光斑大小大约为 $34\ \mu\text{m}\times 34\ \mu\text{m}$,与设计值基本符合,且光斑能量分布集中,没有暗环。同样参量条件下基于掩模的光学系统所得到的光斑不仅仅在大小上远大于前者,而且出现暗环。从 30° 入射和 60° 入射的情况也可以看到,新型光学系统的仿真结果要远远好于基于掩模的光学系统,特别是大角度倾斜时,基于掩模的光学系统还出现多个光斑中心的情况。

维仿真结果的比较。从图中可以看出,新型系统光斑较小,能量汇聚,光强较大,当入射角度增大时,光斑长轴逐渐变长,光强则逐渐减小。而基于掩模的光学系统光斑弥散大、光强小,远远小于新型光学系统光斑能量。

图 6 为双圆孔二维仿真结果,孔间距选取 $300\ \mu\text{m}$ 。从图中可以看出,在垂直入射和倾斜入射情况下,成像为两个各自独立的光斑,且光斑能量分布集中;两光斑之间基本没有干涉。图 7 为 6×6 圆孔阵列的仿真结果,孔间距选取为 $300\ \mu\text{m}$,可以看到,光斑之间有明显的界限。

图 5 为新型光学系统与基于掩模的光学系统三

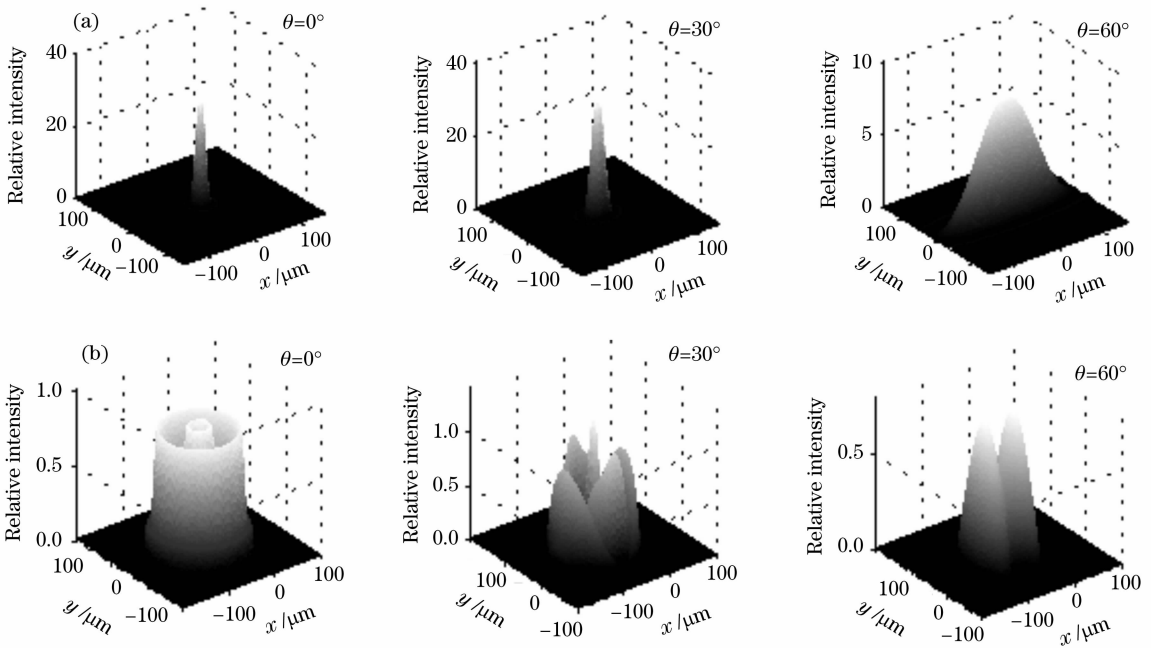


图 5 新型光学系统(a)与基于掩模的光学系统(b)三维仿真结果比较

Fig. 4 Comparison of three-dimensional simulative results between the complex optical system (a) and masking optical system (b)

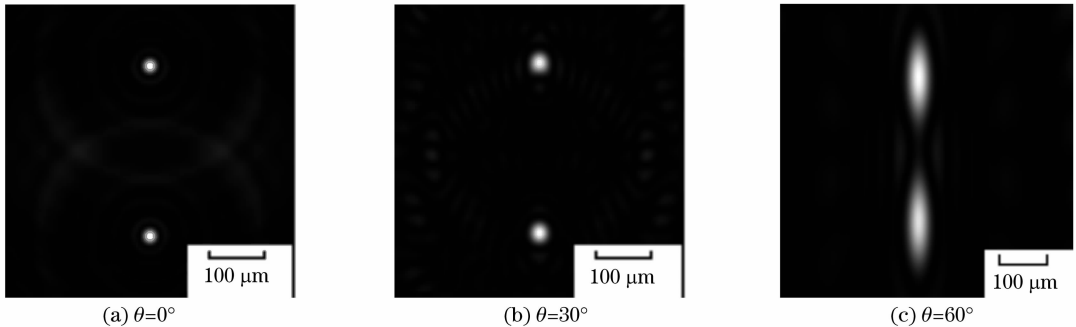
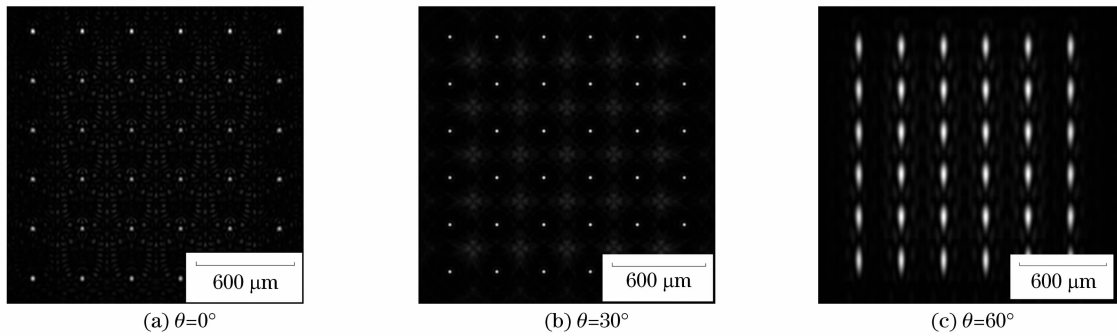


图 6 双圆孔仿真结果

Fig. 6 Simulative results of two holes

图 7 6×6 圆孔阵列仿真结果Fig. 7 Simulative results of 6×6 aperture array

5 结 论

基于夫朗禾费衍射理论,设计了一种基于微透镜的新型数字式太阳敏感器复合光学系统。分析了光学系统的组成,设计了光学系统的相关参量,并对其成像效果进行了数值仿真。仿真结果表明,与基于掩模的光学系统相比,复合光学系统成像光斑能量分布集中,能保证计算光斑中心位置的高精度,而且能保证敏感器具有大视场和高精度的特点。

参 考 文 献

- 1 Carl Christian Liebe, Sohrab Mobasser, Youngsam Bae *et al.*. Micro Sun sensor [C]. *IEEE Proc. Aerospace Conference*, Piscataway, NJ: IEEE Press 2002. 5-2263~5-2273
- 2 Zheng Zhimin, Ding Tianhuai. Optical system design for a micro digital sun sensor[J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(2): 240~243
郑志敏, 丁天怀. 小孔阵列式太阳敏感器的光学系统设计[J]. *光学技术*, 2006, **32**(2): 240~243
- 3 Zheng Zhimin, Ding Tianhuai, Zhang Jianfu. Characteristics of aperture-array diffraction and its application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 294~299
郑志敏, 丁天怀, 张建福. 小孔阵列衍射特性与应用[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 294~299
- 4 Zhou Rui, Fang Jiancheng, Zhu Shiping. Spot size optimization

- and performance analysis in image measurement[J]. *Chin. J. Scientific Instrument*, 2000, **21**(2): 177~179
- 周 锐, 房建成, 祝世平. 图像测量中光斑尺寸优化及性能分析[J]. *仪器仪表学报*, 2000, **21**(2): 177~179
- 5 Yu Daoyin, Tan Hengying. *Engineering Optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 1999
郁道银, 谈恒英. *工程光学* [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999
 - 6 M. Born, E. Wolf. *Principles of Optics* [M]. Yang Jiasun transl., 7th ed., Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005
M. 波恩, E. 沃尔夫. *光学原理* [M]. 第七版, 杨葭孙译, 北京: 电子工业出版社, 2005
 - 7 Yan Qingjing. *Numerical Analysis* [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1989
颜庆津. *数值分析* [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1989
 - 8 Zheng Jianzhou, Yu Qingxu, Lu Yongjun *et al.*. Improved lens arrays optical system with controllable focus width for uniform irradiation[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(3): 331~336
郑建洲, 于清旭, 卢永军等. 焦斑可调的透镜阵列均匀辐照光学系统[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 331~336
 - 9 Yi Hengyu. Parameters optimization of common path system for surface thermal lensing detection in weak absorption[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(1): 91~96
易亨瑜. 弱吸收测量中共光路表面热透镜系统的参量优化[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 91~96
 - 10 Yao Qijun. *Optical Tutorial* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1989
姚启钧. *光学教程* [M]. 北京: 高等教育出版社, 1989