

基于6次反射环形孔径透镜的微光学标签系统

陈伟, 梁忠诚, 戈兰, 孔梅梅

南京邮电大学光电工程学院, 江苏 南京 210003

摘要 介绍了一种微光学标签系统, 结合理论分析提出用大孔径长焦距的透镜作为接收端可以提升系统的成像性能。利用 Zemax 光学软件设计出一种大孔径长焦距的6次反射环形孔径超薄透镜, 该透镜前表面为平面反射镜, 后表面为4个同轴环形非球面反射镜, 外直径为28 mm, 有效焦距为38 mm, 镜头厚度为5 mm。在保证与4次反射透镜通光孔径一致的前提下, 通过改进透镜结构增加了反射次数, 减小了厚度, 扩展了焦距。对基于环形孔径超薄透镜为接收端的微光学标签系统进行了整体优化分析, 并给出了模拟成像图的对比, 结果发现使用6次反射透镜做接收端可以增加系统的接收距离, 减小接收图像的畸变。最后利用同态滤波的处理方法, 有效地校正了亮度不均匀的接收图像。

关键词 光学设计; 微光学标签系统; 6次反射环型孔径透镜; 亮度不均匀校正

中图分类号 O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.062201

Micro-Optics Label System Based on Six-Reflection Fold Annular Aperture Lens

Chen Wei, Liang Zhongcheng, Ge Lan, Kong Meimei

*School of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications,
Nanjing, Jiangsu 210003, China*

Abstract A special micro-optics label system is introduced. A large aperture and long focal length lens structure, which is used as the system receiving terminal, is demonstrated to be able to improve the imaging performance significantly by theoretical analysis. A six-reflection fold annular aperture ultra-thin lens with large aperture and long focal length is designed with the aid of optical engineering software Zemax. The front surface is a plane mirror and the rear surface consists of four concentric annular aspheric reflectors. The outer diameter of the lens is 28 mm, the effective focal length is 38 mm, and the thickness of the lens is 5 mm. With the clear aperture consistency of a four-reflection fold annular aperture lens, the structure of the equipment is improved to increase the number of reflections, effectively reduce the thickness of the lens, and enlarge the focal length of lens. In this work, an optimized design and analysis to the micro-optics label system are reported. It is based on the annular aperture ultra-thin lens as receiving terminal. And the comparison of simulation imaging is given. The results show that using six-reflection fold annular aperture lens as receiving terminal can increase the receiving distance and reduce the distortion of simulated images. Finally, a received image with non-uniform brightness is effectively corrected by using homomorphic filtering method.

Key words optical design; micro-optics label system; six-reflection fold annular aperture lens; luminance nonuniformity correction

OCIS codes 220.3620; 350.3950; 060.4510; 100.2960

1 引言

随着科学技术的发展和信息技术的进步, 标签识别技术^[1]在过去几十年得到了迅猛发展, 尤其是以条码

收稿日期: 2017-01-20; **收到修改稿日期:** 2017-02-01

作者简介: 陈伟(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事光通信方面的研究。E-mail: wchen_njupt@163.com

导师简介: 梁忠诚(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事物理学和光电子技术方面的研究。

E-mail: zcliang@njupt.edu.cn

技术、射频识别技术(RFID)以及近场通信技术(NFC)^[2-4]为代表的标签识别技术在人们的日常生活中得到了越来越广泛的应用。如何增大标签码存储的信息量,减小其所占的空间体积,提高安全可靠,已成为当前标签识别技术研究的热点。2009年,美国麻省理工学院 Media Lab 的研究人员发明出一种交互式光学标签^[5],这种名为 Bokode 的微型可视化光学标签大小只有几毫米,比传统条形码小很多,但储存的信息量却比同尺寸的条形码多数百万倍,而且消除了 RFID 标签和 NFC 标签存在的信息泄露风险。2010年,南京邮电大学光电工程学院制作了一款微型可视化光学标签,2011年又相继研制了有源、无源和集成化微光学标签系统^[6-8],2015年又设计出一款基于4次反射环形孔径透镜的微光学标签系统。本文在此基础上,设计了一款6次反射环形孔径超薄透镜^[9],将其作为系统的接收端镜头,通过与基于4次反射环形孔径透镜的系统^[10]作对比,给出模拟成像图的比较。最后,利用同态滤波的软件处理方法解决模拟成像图的亮度不均匀问题。

2 6次反射环形孔径透镜

6次反射环形孔径透镜的结构示意图如图1所示,其前表面为平面反射镜,后表面为位于同一基底上的4个同轴高次非球面反射镜,光线从前表面边缘环带进入,在前后表面来回反射6次从后表面射出。后表面采用同一基底的非球面设计,并利用金刚石车削的方法,不仅可以简化加工工艺和装配流程,还可以有效地校正球差^[11-13]。在 Zemax 软件中偶次非球面主要由如下公式定义:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + a_1r^4 + a_2r^6 + a_3r^8 + a_4r^{10} + a_5r^{12} + a_6r^{14} + a_7r^{16} \dots, \quad (1)$$

式中 c 代表非球面顶点的曲率($1/R_0$), R_0 代表顶点处的曲率半径, k 代表二次曲面常数, r 代表距离光轴的水平距离, $a_1 \sim a_7$ 为非球面修正系数^[14]。表1给出了6次反射环形孔径透镜的非球面系数。

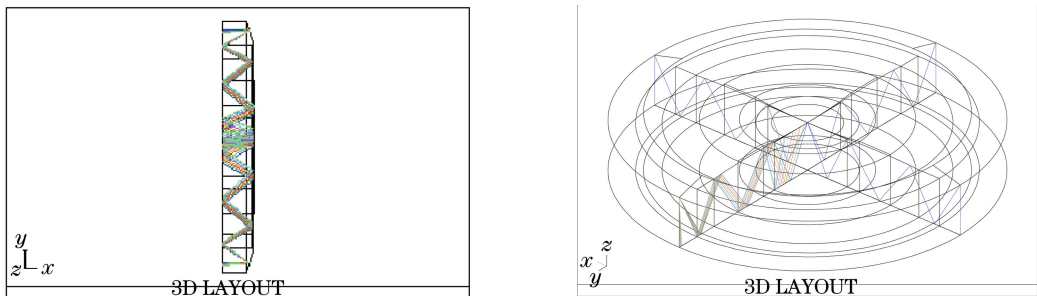


图1 6次反射环形孔径透镜的结构示意图

Fig. 1 Structure schematic diagram of six-reflection fold annular aperture lens

表1 6次反射环形孔径透镜的非球面参数

Table 1 Aspheric coefficients of six-reflection fold annular aperture lens

Aspheric correction coefficient	Reflective aspheric surface serial number			
	1	2	3	4
a_1	-2.268×10^{-6}	-7.744×10^{-5}	8.781×10^{-4}	-1.387×10^{-3}
a_2	1.240×10^{-9}	1.265×10^{-6}	-4.146×10^{-5}	-1.880×10^{-2}
a_3	1.246×10^{-11}	-1.762×10^{-8}	1.386×10^{-6}	1.373×10^{-2}
a_4	-1.257×10^{-13}	1.603×10^{-10}	-2.133×10^{-8}	-4.608×10^{-3}
a_5	6.342×10^{-16}	-8.927×10^{-13}	-6.162×10^{-11}	8.345×10^{-4}
a_6	-1.196×10^{-18}	2.803×10^{-15}	4.099×10^{-12}	-7.824×10^{-5}
a_7	6.076×10^{-22}	-3.789×10^{-18}	-1.144×10^{-14}	2.973×10^{-6}
R_0	-31.647	25.913	85.398	11.684

3 基于6次反射环形孔径透镜的微光学标签系统

通过分析得出双透镜的逐级放大结构可适用于该系统,利用共焦原理可论证对微型标签码进行动态识

别的可行性,结合几何光学的方法可推导出微型标签码通过双透镜组成的光学系统所成像的大小。直接参考文献[6-8]的理论推导结果,即成像大小 $b' = f_c a / L$, 微型标签码的有效放大倍数 $M = f_c / f_a$, 其中标签透镜的焦距为 f_a , 微型标签码置于小透镜的前焦面处,接收端镜头的焦距为 f_c , 孔径大小为 a , 镜头与标签透镜的距离为 L , 标签透镜的孔径大小为 a' , 微型标签码的大小为 b 。由于在发射端使用的是性能参数固定的集成化结构,因此从理论推导的结果可以得出:增大 f_c 和 a 可提升系统的识别距离和成像分辨率,即在接收端使用大孔径长焦距的镜头可改善系统的成像性能^[15]。图2为微光学标签系统的结构示意图,在接收端使用了具有大孔径长焦距特性的6次反射环形孔径镜头,表2为通过仿真软件设计的系统参数。

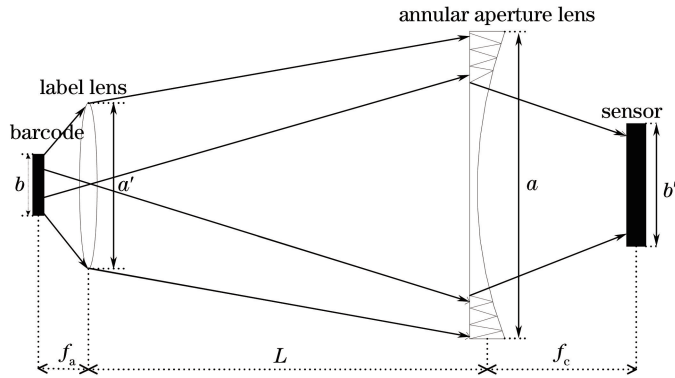


图2 微光学标签系统结构示意图

Fig. 2 Structure schematic diagram of micro-optics label system

表2 微光学标签系统的设计参数

Table 2 Design parameters of the micro-optics label system

Parameter	Value	Parameter	Value
Length of micro barcode b	2 mm	Outer diameter of annular aperture lens D	28 mm
Diameter of label lens a	6 mm	Effective focal length of annular aperture lens f_c	38 mm
Focal length of label lens f_a	10 mm	Thickness of annular aperture lens T	5 mm
Designed receiving distance L	150 mm	System field of view	12°

4 仿真结果与分析

系统模拟成像图如图3所示,可以看出,基于6次反射透镜系统的最佳设计接收距离可达150 mm,基于4次反射透镜系统的最佳设计距离为125 mm,而且通过仿真数据可知,基于6次反射透镜的系统动态可接收范围最大可达125~175 mm,基于4次反射透镜的系统动态范围只有120~140 mm,超出动态范围后接收图像的中心暗黑区域将继续增大以至于两个系统都无法解码;从图3中还可以得出,在最佳设计距离处,基于4次反射透镜系统的模拟成像图边缘还有些许残留畸变,基于6次反射透镜的系统模拟成像图则几乎不存在畸变。再结合图4的一次畸变系数 k_1 随相对探测距离 ΔL (ΔL 为实际读取距离 L 与设计距离 L_0 的差值,即 $\Delta L = L - L_0$) 的变化曲线可得,基于6次反射透镜的系统在动态读取范围内的一次畸变系数要明显小于基于4次反射透镜的系统的一次畸变系数,当畸变系数 k_1 在 $(-0.13, 0.16)$ 范围内时,图4(a)所示的相对探测距离 ΔL 的动态范围为 $(-20, 20)$,而图4(b)所示的相对探测距离 ΔL 的动态范围只有 $(-2, 2)$,这也说明了基于6次反射透镜的系统明显地改善了成像畸变。因此,本研究设计的6次反射透镜用于微光学标签系统,不仅可以增大系统的可识别距离,还显著减小了系统的成像畸变。

从图3还可以看出,图3(b)与(c)在亮度分布上没有明显改善,尤其是中心存在暗黑区域,这是由于多次反射环形孔径透镜存在中心遮拦,造成模拟成像图的中央区域光强度较小,而且4次与6次反射环形透镜的通光孔径大小一样,因此两个系统模拟成像图的亮度并没有太大改变。文中采用基于光照-反射模型的同态滤波方法来消除图像的亮度不均匀^[16-19],图3(d)是经过处理后的图像,从图像的对比可以看出,处理后的图像亮度得到显著改善。图5是基于6次反射透镜系统的模拟成像图经过同态滤波前后的灰度直方图,由图5(a)和(b)的对比可以看出,滤波后直方图在整个灰度级上显著扩展,平均值明显高于滤波前。图6为同

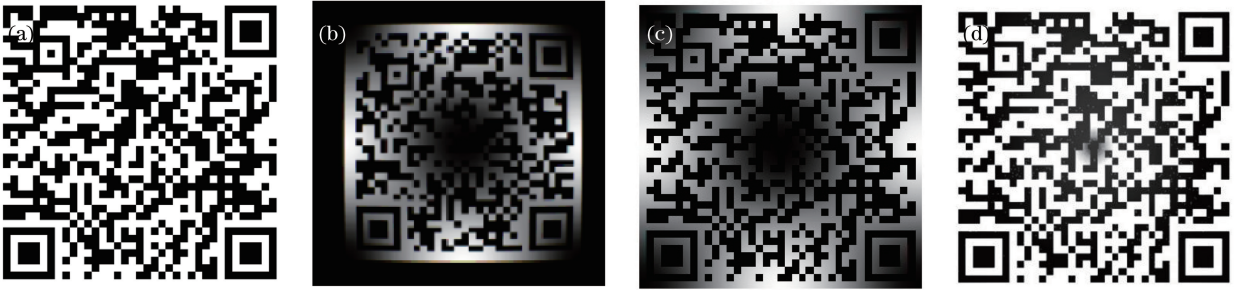


图3 系统模拟成像图。(a)原始微型标签码;(b)基于4次反射透镜的系统在125 mm处的模拟成像图;基于6次反射透镜的系统在150 mm处的(c)模拟成像图及其(d)亮度校正图;(d)基于6次反射透镜的系统在150 mm处模拟成像图的亮度校正

Fig. 3 Image of system simulation. (a) Original micro-optical label; (b) simulated image of the system based on four-reflection aperture lens at the design receiving distance of 125 mm; (c) simulated image and its (d) luminance correction image of the system based on six-reflection aperture lens at the design receiving distance of 150 mm

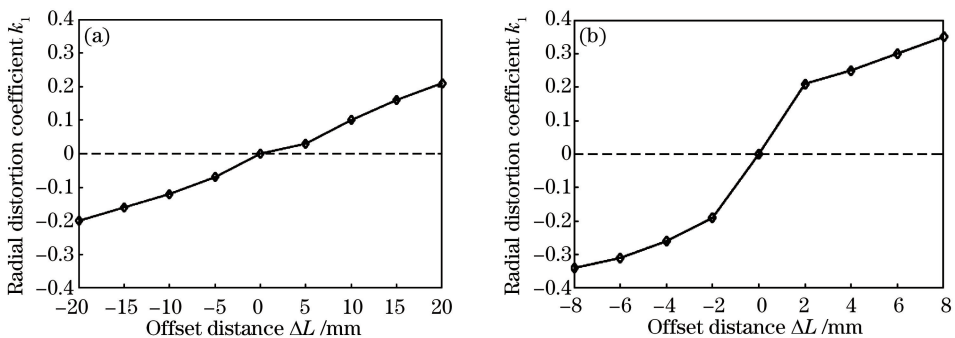


图4 一次畸变系数 k_1 随相对探测距离 ΔL 的变化曲线。

(a)基于6次反射环形孔径透镜的系统;(b)基于4次反射环形孔径透镜的系统

Fig. 4 Single distortion coefficient k_1 changes with detection distance ΔL . (a) System based on six-reflection fold annular aperture lens; (b) system based on four-reflection fold annular aperture lens

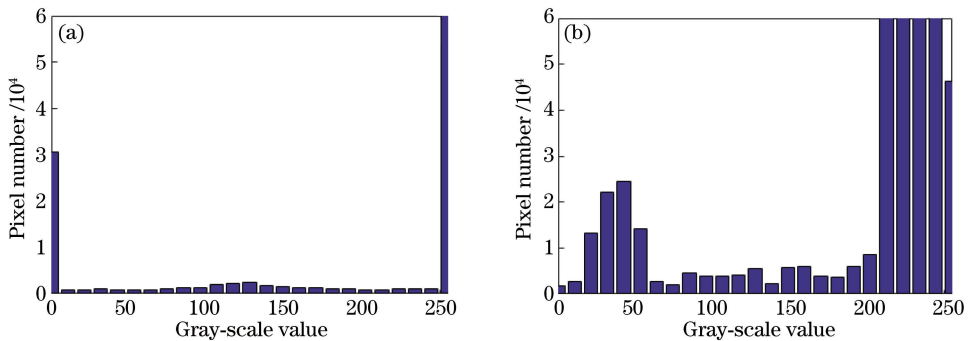


图5 基于6次反射透镜系统的模拟成像图。(a)滤波前;(b)滤波后

Fig. 5 Simulated images based on six-reflection lens system. (a) Before filtering; (b) after filtering

态滤波前后灰度值的均方差随相对探测距离 ΔL 的变化曲线,由图中的曲线可知,在 $\Delta L = 0$ 处同态滤波前后灰度值的均方差均为最小,说明微光学标签系统在设计距离处的模拟成像图的亮度相对均匀,当接收距离偏移设计距离时,模拟成像图的对比度不断下降,亮度越来越不均匀,超过动态接收范围后,模拟成像图已解码不出任何信息,亮度不均匀已无法校正;在相对探测距离 ΔL 的动态范围为 $(-20, 20)$ 时,同态滤波前模拟成像图灰度值的均方差在 $(103, 115)$ 范围内,而同态滤波后模拟成像图灰度值的均方差在 $(69, 112)$ 范围内,模拟成像图滤波后灰度值的均方差显然更小,图像的亮度更加均匀,因此采用同态滤波的方法可有效地改善模拟成像图亮度的不均匀。

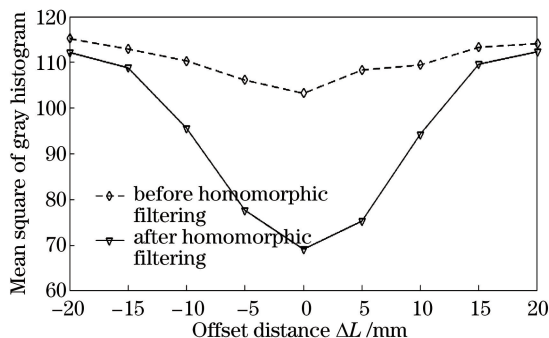


图 6 同态滤波前后灰度值的均方差随相对探测距离 ΔL 的变化曲线

Fig. 6 Mean square error of gray value changes with offset distance ΔL before and after homomorphic filtering

5 结 论

设计了一款基于 6 次反射环形孔径透镜的微光学标签系统,通过与基于 4 次反射环形孔径透镜的系统作对比发现,不仅 6 次反射环形孔径透镜本身的结构更加轻薄,而且系统的成像性能也更加优越,成像的畸变更小,动态接收距离更大。最后,采用基于光照-反射模型的同态滤波方法有效地校正了接收亮度不均匀的图像。

参 考 文 献

- [1] Zhang Chenghai, Zhang Duo. Modern automatic identification technology and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 9.
张成海, 张 铎. 现代自动识别技术与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 9.
- [2] Zhang Qigui, Zheng Yongjie, He Zhi. Bar code technology and application [J]. Electronic Technology, 1996(3): 26-29.
张起贵, 郑永杰, 贺 智. 条形码技术及应用 [J]. 电子工艺技术, 1996(3): 26-29.
- [3] Shen Yuchao, Shen Shuqun. Radio frequency identification technology and its development [J]. Application of Electronic Technology, 1999, 25(1): 4-5.
沈宇超, 沈树群. 射频识别技术及其发展现状 [J]. 电子技术应用, 1999, 25(1): 4-5.
- [4] Liu Hao. Application of near field communication based on NFC technology [J]. China Radio, 2010(12): 1-2.
刘 浩. 基于 NFC 技术的近场通信应用探索 [J]. 中国无线电, 2010(12): 1-2.
- [5] Mohan A, Woo G, Hiura S, *et al.* Bokode: imperceptible visual tags for camera based interaction from a distance [C]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2009, 28(3): 98.
- [6] Lin Wu, Liang Zhongcheng, Zhang Hao. Design of micro-optical label system of active encryption [J]. Internet of Things Technologies, 2012, 2(3): 25-28.
林 武, 梁忠诚, 张 浩. 有源加密型微光学标签系统的设计 [J]. 物联网技术, 2012, 2(3): 25-28.
- [7] Zhang Hao, Liang Zhongcheng, Lin Wu. The design of micro visual optical tag system by passive light source [J]. Internet of Things Technologies, 2012, 2(4): 22-24.
张 浩, 梁忠诚, 林 武. 无源微型可视化光学标签系统的设计 [J]. 物联网技术, 2012, 2(4): 22-24.
- [8] Li Zhipeng, Liang Zhongcheng. Design and production of integrated micro-optics tag system [J]. Electro-Optic Technology Application, 2012, 28(2): 5-8.
李志鹏, 梁忠诚. 集成化微光学标签系统的设计与制作 [J]. 光电技术应用, 2013, 28(2): 5-8.
- [9] Tremblay E J, Stack R A, Morrison R L, *et al.* Ultrathin cameras using annular folded optics [J]. Applied Optics, 2007, 46(4): 463-471.
- [10] Ge Lan, Liang Zhongcheng. Micro-optics label receiving system based on annular aperture ultra-thin lens [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1222001.
戈 兰, 梁忠诚. 基于环型孔径超薄透镜的微光学标签接收系统 [J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1222001.
- [11] Geary J M. Introduction to lens design: with practical ZEMAX examples [M]. Richmond: Willmann-Bell, 2002.

- [12] Wang Peng, Du Xue, Hui Changshun. Polishing diamond turning surface micro texture improvement[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0322001.
王 朋, 杜 雪, 回长顺. 金刚石车削表面微纳结构的气囊抛光改进[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0322001.
- [13] Gao Duorui, Hu Hui, Wang Wei, *et al.* A novel and easy processing, design of off-axis three mirror optical system alignment[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 616001.
高铎瑞, 胡 辉, 汪 伟, 等. 一种改进的易于加工、装调的离轴三反光学系统设计[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 616001.
- [14] Pan Junhua. The design, manufacture and test of the aspherical optical surfaces[M]. Beijin: Science Press, 1994: 6-20.
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 6-20.
- [15] Haney M W. Performance scaling in flat imagers[J]. Applied Optics, 2006, 45(13): 2901-2910.
- [16] Liu Jia'nan, Zhang Qiuju. Implementation of image gray level correction algorithm based on OpenCV[J]. Journal of Jiangnan University (Natural Science Edition), 2011, 10(6): 662-666.
刘佳男, 张秋菊. 基于 OpenCV 的图像灰度校正算法的实现[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2011, 10(6): 662-666.
- [17] Liang Chuanhui, Wang Yudan, Du Guohao, *et al.* Study on contrast enhancement algorithm for X-ray images of synchrotron radiation[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0310003.
梁传晖, 王玉丹, 杜国浩, 等. 同步辐射 X 射线图像对比度增强算法研究[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0310003.
- [18] Zhang Chengyi. Optimal design of homomorphic filter based on Matlab[J]. Applied Optics, 2010, 31(4): 584-588.
张成义. 基于 Matlab 的同态滤波器的优化设计[J]. 应用光学, 2010, 31(4): 584-588.
- [19] Sujatha C M, Navinkumar K, Arunlal K S, *et al.* Performance evaluation of homomorphic filtering, anisotropic filtering and autocontrast algorithm[C]. Advances in Computing, Control & Telecommunication Technologies, 2009: 27-29.