

L型全息波导构型设计

相广鑫^{1,2}, 郭岩³, 李文强², 闫占军², 谢意², 周家武²

(1. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000; 2. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000;
3. 中国人民解放军驻沈阳飞机工业(集团)有限公司军事代表室, 沈阳 100850)

摘要: 针对单反射面单波导板构型光栅设计与制造复杂的问题, 提出一种L型单波导二维扩展构型。该构型由2个侧反射面和3块周期和条纹走向完全相同的全息光栅组成, 用于降低光栅的设计制造难度。根据对构型光路的计算分析, 该构型的转向光栅尺寸不超过40 mm × 40 mm。仿真结果表明, 该构型正确合理, 且可以实现30° × 30°的视场和φ30 mm的大出瞳显示, 可用于增强现实显示或头戴式显示。

关键词: 波导构型; 全息光栅; 头戴式显示; 增强现实

中图分类号: TN25 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2017)03-0089-04

Design of a Holographic Waveguide with L Configuration

XIANG Guang-xin^{1,2}, GUO Yan³, LI Wen-qiang², YAN Zhan-jun², XIE Yi², ZHOU Jia-wu²

(1. Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang 471000, China; 2. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China; 3. PLA Military Representative Office in Shenyang Aircraft Industries(Group) Co. Ltd, Shenyang 100850, China)

Abstract: It is usually difficult to design and manufacture the gratings of single plate with single reflecting surface, thus we proposed a two-dimensional, L-shaped extended configuration with single plate. This configuration consists of two specular reflecting surfaces and three holographic gratings with the same period and groove orientation, which makes gratings design and fabrication easier. According to the calculation and analysis to the optical path of configuration, the size of the turning grating is no larger than 40 mm × 40 mm. The simulation result demonstrates that the display configuration is reasonable and correct, and can realize the display effect with 30° × 30° field of view and φ30 mm large exit pupil. This configuration can be applied to an augmented reality display or a Head-Mounted Display (HMD).

Key words: waveguide configuration; holographic grating; wearable display; augmented reality

1 概述

全息波导显示技术结合波导板的全反射特性和全息光栅的衍射特性, 可实现大视场、大出瞳的图像输出, 在战斗机的平视显示器(HUD)和头盔显示器(HMD)中有重要的应用, 并且在越来越多的民用领域发挥重要的作用, 如在增强现实^[1](AR)领域及虚拟现实^[2](VR)领域都取得了重要的成果。

英国BAE公司将全息波导技术运用在头盔显示器上, 设计了Q-sight型HMD^[3], 目前已实现商用并应用于各种战机。典型的Q-sight™100型HMD采用如

图1所示的单波导板构型对图像进行二维扩展, 有效提高显示性能。该构型采用单反射面加两种光栅的结构, 可实现的视场角为40° × 30°, 出瞳为φ30 mm, 使用单个高亮度LED照明的微显示器。该设备位于眼睛前方, 可显示飞行参数和传感器图像, 质量小于120 g, 在尺寸、重量、体积等方面具有明显的优势, 而且还在光学出瞳上有了较大的改善^[4-6]。

这种构型的转向光栅尺寸较大, 共使用了2种配置角度的光栅, 光栅的设计和制造较为复杂。为解决光栅尺寸大、设计与制造复杂的问题, 本文提出一种由3部分相同光栅和2个反射面组成的L型波导板构型, 该构型中的3块光栅参数完全相同, 均为全息光栅, 用于降低光栅的设计和制造难度。经光路计算与仿真, 证明该构型能够实现30° × 30°的视场与φ30 mm的出瞳显示, 适用于增强现实显示系统或头戴式显示系统。

收稿日期: 2016-06-01 修回日期: 2016-07-25

基金项目: 航空科学基金(20135169016)

作者简介: 相广鑫(1992—), 男, 黑龙江大庆人, 硕士生, 研究方向为全息光学。

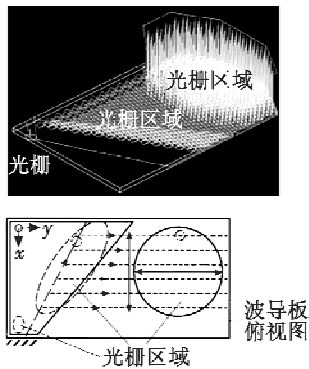


图 1 BAE 使用的单波导显示构型

Fig. 1 Configuration with single plate used by BAE

2 全息波导显示基本原理

全息波导显示系统通常由显示像源、准直镜组和波导板元件 3 部分构成,如图 2 所示。像源发出的光线经过中继光学系统准直后,由耦合输入光栅调制后满足全反射条件在波导中传播,到达耦合输出区时,一部分光线经过耦合输出光栅的调制后不再满足全反射条件,以一定的角度从波导中衍射输出,不同像点所对应的不同视场角的平行光线保持了图像的完整信息;另一部分光线继续在波导中传播并衍射,最终在观察点看到具有较大视场角,成像于无穷远的图像。由于全息波导元件有很好的透明度,外界光线可以穿过波导元件进入人眼,因此该图像能与外景很好地叠加^[7]。

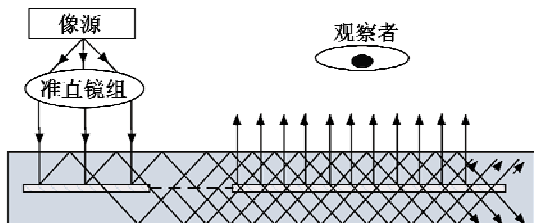


图 2 波导显示系统组成

Fig. 2 Composition of waveguide display system

为实现大出瞳显示,需要对全息波导显示系统的光瞳进行扩展,若仅在一维方向扩展,会导致垂直该方向上的视场范围狭小,水平正负视场的光线传播一段距离后便彼此分开,导致显示视场丢失,如图 3 所示,因而必须对全息波导显示系统进行二维扩展^[8]。

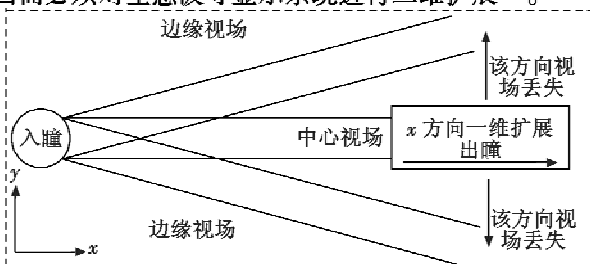


图 3 一维扩展导致边缘视场丢失示意图

Fig. 3 Lost of marginal view field by one-dimension extending

3 L 型波导板基本结构

全息波导显示系统扩展出瞳一般使用 3 种构型:双波导板扩展结构、波导杆+波导板扩展结构和单波导板扩展结构。其中,单波导板扩展结构将所使用的光栅集成在一块波导板上,降低了系统的复杂性、成本和体积,同时提高了光学效率,而且玻璃表面、全息光栅设计数量的减少使得这种构型比波导杆+波导板构型的设计步骤减少了 40%。单波导板构型利用相对简单的结构实现光瞳的二维扩展,是目前最为紧凑、高效的构型。

L 型波导板构型也是一种单波导板构型,基本结构如图 4 所示。该构型中 3 部分光栅均为相同的类型,可降低光栅的设计和制造难度,增加 2 个侧反射面,使结构更加紧凑。由于构型的外形类似“L”,因此称其为 L 型波导板构型。

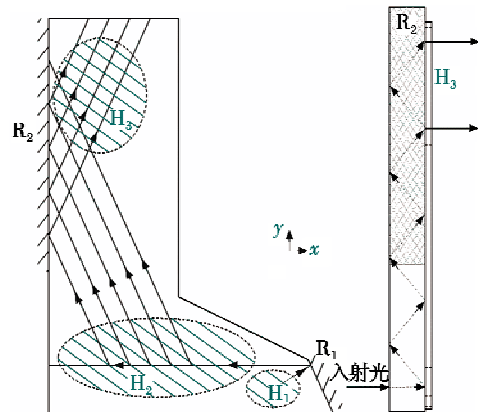


图 4 L 型波导板结构

Fig. 4 Structure of L configuration waveguide plate

本构型主要由 3 块全息光栅 H_1, H_2, H_3 和 2 个反射面 R_1, R_2 组成,其中,反射面 R_1 与 R_2 起到折叠光线的作用,使波导板结构紧凑。反射面 R_1 与 x 轴间存在一个夹角,该角度由光栅的条纹角度及光栅的相对位置决定; R_2 沿 y 轴方向,位置也与光栅的相对位置有关。构型中所用光栅均为相同条纹走向的锥形光栅,即光栅的入射光线、衍射光线及光栅膜层法线不在同一平面,衍射光线与入射光线及法线之间会形成一个锥角。对于该类型的光栅有下述光栅方程式成立^[9]:

x 轴

$$-\frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{sub}} \sin \theta_i + \frac{2\pi}{\Lambda} m \cos \phi_i = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{sub}} \sin \theta_d \cos \phi_d \quad (1)$$

y 轴

$$\frac{2\pi}{\Lambda} m \sin \phi_i = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{sub}} \sin \theta_d \sin \phi_d \quad (2)$$

z 轴

$$-\frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{sub}} \cos \theta_i + \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{sub}} \cos \theta_d = 0 \quad (3)$$

式中： n_{sub} 为波导板折射率(简化为 n)； A 为光栅周期； $2\pi/A$ 为光栅矢量，一般用 \vec{K} 表示，大小为 $2\pi/A$ ，方向为沿着与光栅沟槽垂直的方向； m 为衍射级次，本文中取 $m=1$ ； θ_i 为入射平面内的入射角； ϕ_i 为入射光线的方位角； θ_d 为衍射角； ϕ_d 为衍射光线方位角。各角度的定义详见图5。当入射光线在 xz 平面内时，衍射光线并不在该平面内，而是在与 xy 平面正交的某个平面内。

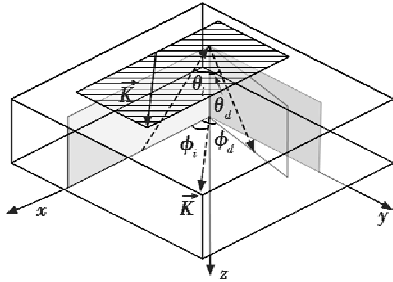


图5 锥形光栅衍射角度示意图

Fig. 5 Diffraction angles of conical grating

该构型3块光栅均为同类型的全息光栅，由3块光栅的相位函数可得

$$\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 0 \tag{4}$$

式中， ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 分别为光栅 H_1, H_2, H_3 的光栅相位函数。由式(4)可知，该波导显示系统的总相位在整个波段内变化为零，不同波长的衍射光线仅随入射光波的方向变化，方向相同的入射光线，衍射输出的光线方向也相同。

4 系统光路计算与仿真

根据锥形光栅的3个方程式(1)~式(3)，已知入射光的视场角和方位角即可算得经过耦合输入光栅 H_1 的衍射角和方位角，同时该光栅需满足能使全视场的光线衍射后在波导板内发生全反射，据此可以确定光栅 H_1 的周期及全视场光线的衍射角与方位角范围。如取中继光学系统的出射光视场为 $30^\circ \times 30^\circ$ ，像源光波长 $\lambda = 532 \pm 5 \text{ nm}$ ，入瞳尺寸定为 $\phi 6 \text{ mm}$ ，波导板厚度定为 3 mm ，材料为Bak7，折射率为 $n = 1.57226$ ，取反射面 R_1 与 x 轴的夹角为 60° ，各光栅的沟槽与 x 轴负方向的夹角为 30° 。为使边缘视场光线进入波导板后也能发生全反射，取 $t = \lambda/nA = 338.37/A$ ， t 的物理意义为入射波长与光栅周期及光栅材料折射率乘积的比重，可用来显示光栅周期与波长的大小关系。根据式(1)~式(3)可得到光栅输出衍射角 θ_d 与入射角 θ_i ($-15^\circ \sim +15^\circ$)及 t 之间的关系，如图6所示。

由于 t 越大，光栅周期 A 越小，考虑到制造难度及衍射角必须满足 $\theta_d \geq \arcsin 1/1.57226 = 39.5^\circ$ ，可取 $t = 0.8$ ，此时光栅 H_1 的周期为 413 nm ，若选择折射率 n 更小的材料作为波导板材料，则 t 值不变时光栅周期

A 可更大，便于制造，但此时全反射条件改变， t 值亦需重新选取。其他两光栅 H_2 和 H_3 的周期与 H_1 相同，并可得到边缘视场光线即 $\theta_{i1} = 15^\circ$ 的衍射角及方位角为： $\theta_{d1} = 45^\circ, \phi_{d1} = 78.5^\circ$ 。由 H_1 衍射的光线在经过反射面 R_1 后方位角按反射规律改变，衍射角不变；经过转向光栅 H_2 ，由于光栅周期已知，可直接通过光栅方程得到转折后光线的衍射与方位角。光线再经过反射面 R_2 和输出光栅 H_3 ，同上述计算方法可得到最终边缘光线的输出衍射角度为 $\theta_{d3} = -15^\circ$ ，同样计算可得当 $\theta_{i1} = -15^\circ$ 时，最终输出衍射光线 $\theta_{d3} = 15^\circ$ 。可知输出光线视场与入射视场完全相同，仍以 $30^\circ \times 30^\circ$ 的视场从 H_3 衍射输出进入人眼。

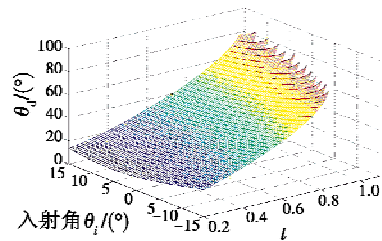


图6 输出衍射角 θ_d 与入射角 θ_i 及 t 之间的关系

Fig. 6 Output diffraction angle θ_d as a function of incidence angle θ_i and t

通过对光路的计算分析，可得到全视场光线在波导板内传播的光路，各光栅及反射面需对全视场光线均起作用，据此可以确定各光栅和反射面以及所需波导板的尺寸大小。由此可得到系统的转向光栅 H_2 的尺寸不超过 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ ，波导板的总尺寸不超过 $85 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ ，输出光线视场仍为 $30^\circ \times 30^\circ$ ，可以实现 $\phi 30 \text{ mm}$ 的大出瞳显示。

按上述条件，利用光路分析得到的尺寸数据，通过Code V光学设计软件对该波导板构型进行仿真，得到光线在波导板内的光路，如图7所示。

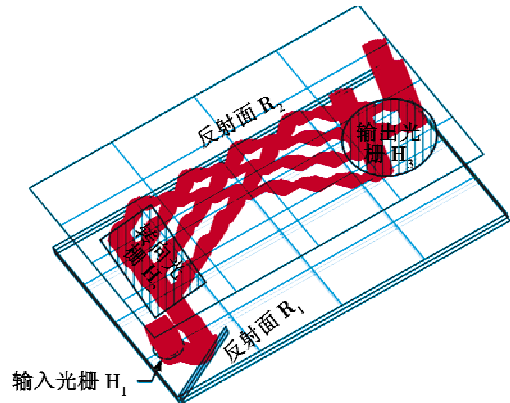


图7 L型波导板内部光路仿真图

Fig. 7 Simulation of optical path inside L-shape plate

仿真结果证明了该构型设计上的正确性与合理性，通过对波导板内入射 0° 视场光线光路的追迹，给

出了光线在波导内传播时各次反射与衍射的光路,最终输出光束能够充满 $\phi 30$ mm 孔径的出瞳,验证了该构型确能实现 $\phi 30$ mm 的大出瞳显示。

5 结束语

本文提出一种双反射面 L 型波导板的二维扩展构型,该构型使用的 3 部分全息光栅有相同的周期和条纹走向,降低了光栅的设计和制造难度。另外,对该构型的光路进行理论分析和仿真,确定了波导板内部的光路及主要特征尺寸,计算结果表明,该构型的转向光栅尺寸不超过 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 且可以实现 $30^\circ \times 30^\circ$ 的大视场;仿真结果表明,该构型能实现 $\phi 30$ mm 的大出瞳显示,该构型可以应用于增强现实系统,可为高性能显示系统提供理论支持。

参考文献

- [1] CARMIGNIANI J, FURHT B, ANISETTI M, et al. Augmented reality technologies, systems and applications[J]. *Multimedia Tools & Applications*, 2011, 51(1):341-377.
- [2] IAN A B, VINCENT A H. Waveguide: US, 20110026128 [P]. 2011-02-03.
- [3] ALEX C. Optical waveguide technology & its application in head mounted displays [C]//*Proceedings of SPIE, Head and Helmet-Mounted Displays XVII*, Baltimore 2012:83830-E11.
- [4] PASI S. Diffractive exit-pupil expander with a large field of view [C]//*Proceedings of SPIE, Photonics in Multimedia II*, Ari Tervonen, 2008:700105. doi:10.1117/12.780514.
- [5] ALEX C. The application of holographic optical waveguide technology to Q-sight family of helmet mounted displays [C]//*Proceedings of SPIE, Head and Helmet-Mounted Displays XIV*, Orlando, 2009:73260H. doi:10.1117/12.818581.
- [6] SIMMONDS M, VAIERA M. A projection display with two plate-like, co-planar wave-guides grating: EP1922579 [P]. 2007-03-15.
- [7] HIROSHI M, KATSUYUKI A. Optical device and virtual image display device: US, 7747113 [P]. 2010-06-29.
- [8] LEON E. Planar configuration for image projection[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(17):4005-4011.
- [9] EISEN L, GOLUB M A, FRIESEM A A. Total internal reflection diffraction grating in conical mounting[J]. *Optics Communications*, 2006, 261(1):13-18.
- [10] (上接第 76 页)
法所需的节点数量更少。
- [1] ANTONIO P, GRIMACCIA F, MUSSETTA M. Architecture and methods for innovative heterogeneous wireless sensor network applications[J]. *Remote Sensing*, 2012, 4(5):1146-1161.
- [2] ZHANG J, ZHANG M. Energy efficient dynamic mixed key management scheme based on virtual grid in wireless sensor networks[J]. *Journal of Convergence Information Technology*, 2011, 6(7):111-118.
- [3] KUILA P, JANA P K. Energy efficient clustering and routing algorithms for wireless sensor networks: particle swarm optimization approach [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2014(33):127-140.
- [4] HUSSAIN S, MATIN A W, ISLAM O. Genetic algorithm for hierarchical wireless sensor networks [J]. *Journal of Networks*, 2007, 2(5):87-97.
- [5] 熊伟丽,刘欣,陈敏芳,等. 基于差分蜂群算法的无线传感器网络节点分布优化[J]. *控制工程*, 2014, 6(21):1036-1040.
- [6] LIN C, WU G, XIA F, et al. Energy efficient ant colony algorithms for data aggregation in wireless sensor networks [J]. *Journal of Computer and System Sciences*, 2012, 78(6):1686-1702.
- [7] KRISHNANAND K N, GHOSE D. Glowworm swarm optimisation: a new method for optimising multi-modal functions [J]. *International Journal of Computational Intelligence Studies*, 2009, 1(1):93-119.
- [8] ÖZTÜRK C, KARABOĞA D, GÖRKEMLİ B. Artificial bee colony algorithm for dynamic deployment of wireless sensor networks [J]. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2012, 20(2):255-262.
- [9] KRISHNANAND K N, GHOSE D. A glowworm swarm optimization based multi-robot system for signal source localization [M]. Berlin: Springer Heidelberg, 2009:49-68.
- [10] CHEN G, WU X D, ZHU X Q, et al. Efficient string matching with wildcards and length constraints [J]. *Knowledge and Information Systems*, 2006, 10(4):399-419.
- [11] 王翔,李志勇,许国艺,等. 基于混沌局部搜索算子的人工蜂群算法 [J]. *计算机应用*, 2012, 32(4):1033-1036.
- [12] LEI L, SHIRU Q. Path planning for unmanned air vehicles using an improved artificial bee colony algorithm [C]//31st Chinese Control Conference (CCC), IEEE, 2012: 2486-2491.
- [13] 陈志敏,薄煜明,吴盘龙,等. 混沌粒子群优化粒子滤波算法 [J]. *电光与控制*, 2013, 20(1):36-40.