

文章编号:1007-2780(2014)05-0703-06

全息波导显示中输出扩展光栅的衍射效率分布分析

张攀, 杨德兴*, 徐健, 郭钰宁

(西北工业大学理学院 陕西省光信息技术重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要:对于全息波导显示系统,为获得连续的输出光瞳而引入的半透半反膜,会在波导中形成阶跃形光强分布,与阶跃形强度分布相匹配的输出光栅衍射效率须为阶跃形分布,这样才能获得均匀的衍射输出强度。为保证衍射角带宽内所有光线均有较佳的输出强度均匀性,提出了一种连续递增的衍射效率分布光栅模型。建立了基于对阶跃形衍射效率分布的分段加权平均和二次曲线拟合的优化计算模型,计算得到了衍射效率分布曲线,并由衍射效率分布曲线计算得到衍射角带宽内不同视场光束的输出光强分布。结果表明,输出光强位置均匀性最小为 52.4%,出瞳内角度均匀性达到 84.9%。随着分束膜层数的增加,波导阶跃形光强差将会减小,可获得更好的输出强度均匀性。

关键词:全息波导显示;图像均匀性;出瞳连续;衍射效率分布;分束膜

中图分类号:O439 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20142905.0703

Analysis on diffraction efficiency distribution of output extended grating in holographic waveguide display system

ZHANG Pan, YANG De-xing*, XU Jian, GUO Yu-ning

(*Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, School of Science,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China*)

Abstract: For holographic waveguide display system, the beam splitting membrane, adopted for obtaining continuous output pupil, can form step-shaped light intensity distribution, and only when the diffraction efficiency of output grating is step-shaped distribution, can the uniform diffraction output intensity be obtained. To guarantee the output intensity uniformity of light within the diffraction angle bandwidth, a grating model which owns continuous increasing diffraction efficiency is established. Based on segmentation weighted average and quadratic curve fitting of the step-shaped distribution, the calculation model is optimized and curve of diffraction efficiency distribution is obtained. In addition, the output intensity distributions of various fields are calculated from the diffraction efficiency distribution curve. The results show that the minimum position uniformity of output area is 52.4% and angle uniformity within the whole exit pupil could reach to 84.9%. And analysis demonstrates that with the increase number of the beam splitting membrane, the intensity difference between the non-overlap and overlap region would be reduced and better image uniformity obtained.

Key words: holographic waveguide display; image uniformity; continuous exit pupil; diffraction efficiency distribution; beam splitter

收稿日期:2014-03-24;修订日期:2014-04-17.

* 通信联系人, E-mail: dxyang@nwpu.edu.cn

1 引言

全息波导显示技术将全反射导波原理和多重体全息光栅衍射原理相结合^[1-4],可实现大视场、大出瞳图像输出。其中,全息波导是新一代头盔显示系统的关键核心部件^[5],与采用传统光学系统的头显相比,整体质量和体积明显减小,显示性能大幅提高,安装调试和维护难度大大降低^[6-8]。在全息波导显示系统中,成像于无穷远的图像光波在波导中周期性传输,不同视场光线因角度不同其传输周期也不同。当传输周期大于光束宽度时,在输出扩展过程中相邻周期输出的光束将不连续,导致人眼观察时出现图像的闪烁甚至出现图像的不连续现象。成像光束在输出扩展过程中通过波导的多次反射并由全息光栅依次衍射完成,入射到光栅上的光强将依次减弱。为获得均匀无间断的扩展输出,须优化波导结构和输出光栅的衍射效率分布^[9-10]。1999年,Lorne A. Whitehead^[11]设计了一种简化的分区控制衍射效率光栅结构,可提高输出光强均匀性,但出瞳不连续。2002年,Revital Shechter等^[12]仅分析了中心视场光束在输出光栅具有渐变衍射效率分布时的输出光强度均匀性,未考虑光栅衍射带宽内其它视场的输出强度均匀性。2011年,Ian Andrew Baker^[13]等人通过优化波导板折射率、厚度和衍射区域尺寸的关系,使光束在波导内的传输周期逐渐减小,保证了出瞳的连续扩展,对衍射光强的均匀性也有一定改善。在基于多重体全息光栅的全息波导中,视场被分成若干个子视场,每个子视场与相应的全息光栅衍射角带宽对应^[2],其中,不同的视场光束具有不同的传输周期。因此,在输出光栅区域,不同传输周期的光束在光栅上的衍射次数不同,导致子视场内不同视场光束的衍射强度分布出现差异,降低了显示均匀性。本文在波导系统中引入分束膜以消除扩展输出时图像的不连续,并建立基于连续衍射效率分布的数学模型和计算处理方法,以改善输出均匀性及输出能量利用率。

2 全息波导结构与出瞳扩展原理

全息波导扩展原理如图 1 所示,整个系统主

要由透明波导板和全息光栅组成,自左向右分别为输入区、分束传输区和输出区。在输入区,经过准直的图像光由长度为 L_{Gi} 的反射体全息光栅(输入光栅) H_1 高效衍射,耦合进入波导内传输,并保证视场内所有光线在波导与空气界面处满足全反射,且无二次衍射;由 H_1 衍射的光线经波导反射后通过长度为 L_s 的半透半反膜分束传输;再通过长度为 L_{Go} 的反射体全息光栅(输出光栅) H_2 多次衍射输出,由此实现光瞳扩展。由 H_2 输出的光波可由人眼直接观察或者经镜头由成像器件获得图像源发出的图像。由于进入输出光栅的图像光随着衍射次数的增加,入射强度会逐渐减小,因此,为了获得均匀的输出显示,输出光栅的衍射效率应沿传输方向递增。

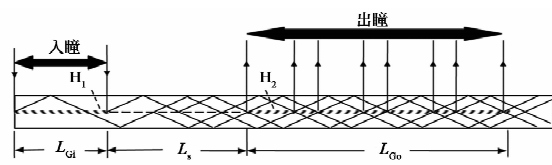


图 1 全息波导结构

Fig. 1 Structure of the holographic waveguide display

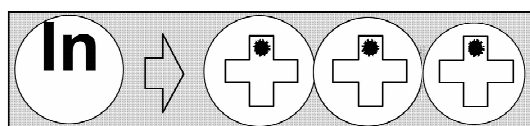
3 图像的均匀性

3.1 图像均匀性描述

全息波导显示系统可以增大出瞳,但却由于多次衍射和光束重叠等问题,降低了输出图像的均匀性。对于输出像的均匀性,可以从 2 个方面进行表征,即位置均匀性和角度均匀性。

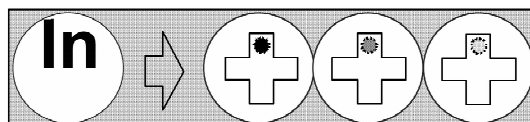
在输出区不同观察位置处,像面上同一点的强度均匀性,称作位置均匀性,它由同一视场光束的输出光强分布决定。在图 2(a)中,在输出区不同位置观察时,像面上相同点的强度基本一致,表明位置均匀性较好,而在图 2(b)中,在不同位置观察时,像面上同一点的强度变化大,此时均匀性较差。

在某一观察位置处,像面上不同点的强度均匀性,称作角度均匀性,它由该位置不同视场角的输出光强差异决定。在图 3(a)中,像面上的各点强度基本一致,均匀性较高,而图 3(b)中,像面上各点强度差别比较大,均匀性较低。



(a) 均匀性高

(a) High uniformity

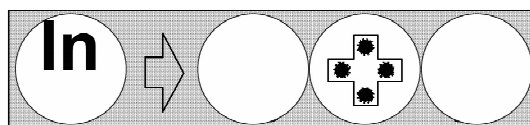


(b) 均匀性低

(b) Low uniformity

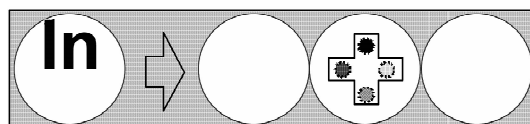
图2 输出像位置均匀性

Fig. 2 Position uniformity of the output image



(a) 均匀性高

(a) High uniformity



(b) 均匀性低

(b) Low uniformity

图3 输出像角度均匀性

Fig. 3 Angle uniformity of the output image

为了定量描述输出像均匀性,可定义:

$$\Gamma = 1 - \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (1)$$

来描述像的均匀性。其中: $I_{\max}$ 为最大输出光强, $I_{\min}$ 为最小输出光强。当计算位置均匀性时,选取不同位置处具有相同口径的同一方向光束的强度最大和最小值;计算角度均匀性时,选取同一观察位置处具有相同口径的不同方向光束的强度最大和最小值。显然, Γ 值越大,图像均匀性越好,当 $I_{\min} = I_{\max}$ 时, $\Gamma = 1$,此时,输出图像完全均匀。

3.2 输出光栅衍射效率的确定

设某一视场角的光束在波导内的传输周期(即反射周期)为 Λ ,经输出光栅第 j 次衍射时,衍

射强度为

$$I_{\text{dif}}^j = I_{\text{in}}^j \eta_j = I_{\text{in}}^{j-1} (1 - \eta_{j-1}) \eta_j = I_{\text{dif}}^{j-1} \frac{(1 - \eta_{j-1}) \eta_j}{\eta_{j-1}}, \quad (2)$$

其中: I_{in}^j 为第 j 次入射光强, η_j 为光束第 j 次衍射时对应光栅处的衍射效率。为了保证输出均匀性,应使 $I_{\text{dif}}^j = I_{\text{dif}}^{j-1}$, 从而有

$$\eta_j = \frac{\eta_{j-1}}{1 - \eta_{j-1}} = \frac{\eta_1}{1 - (j-1)\eta_1}. \quad (3)$$

忽略波导的传输损耗,并假定波导末端光栅衍射效率为 1,则

$$\eta_1 = \frac{1}{J}, \quad (4)$$

其中: J 为该视场角光束在输出光栅上的衍射次数。由(3)式和(4)式即可算出输出光栅的衍射效率分布。

3.3 输出光栅衍射效率的计算

设宽度为 W_i 的光束经输入光栅耦合进波导内,经输出光栅扩展后宽度为 W_o ,由输出光栅长度确定。在未引入半透半反射膜时,经输出光栅单次衍射后输出的光束宽度仍为 W_i 。在保证输入无二次衍射引起的耦合损耗时,光束在波导内的传输周期 Λ 将不小于光束的宽度,但输出光瞳会出现缝隙。为了实现出瞳的连续性,在输入与输出光栅之间引入半透半反膜,光线入射到半透半反膜上,一部分反射,一部分透射,这种方式会导致单次衍射输出光束宽度 w 等于光线在波导内的传输周期 Λ ,因此单次衍射输出光束宽度一般大于输入光束宽度。如图 4 所示,以分束传输区仅有单层分束膜为例,设输入光束宽度 $W_i = 10 \text{ mm}$,光强密度为 1,某视场角光束在波导内传输周期 $\Lambda = 15 \text{ mm}$,则在 Λ 范围内,深灰色区间的入射光强密度为 1,称为重叠区,浅灰色区间的光强密度为 0.5,称为非重叠区,即因光束的重叠情况不同,输出区的光强分布变得不均匀。

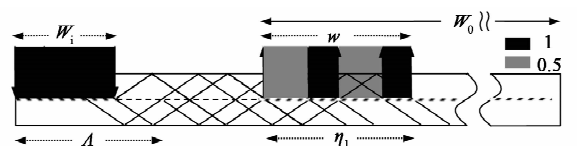


图4 增加分束膜时输入与输出之间关系

Fig. 4 Relationship between input and output beam when the beam splitter is adopted

并由此计算出各个视场的输出效率,如图8中实心圆点所示。在图8中, $\Pi_{\max}=0.88$, $\Pi_{\min}=0.636$ 。输出效率表示不同视场的相对输出光强,而不同视场的光强差异表征了输出图像角度均匀性。因此,由式(1)和输出效率分布曲线,可以计算出整个出瞳内图像的角度均匀性为84.9%。

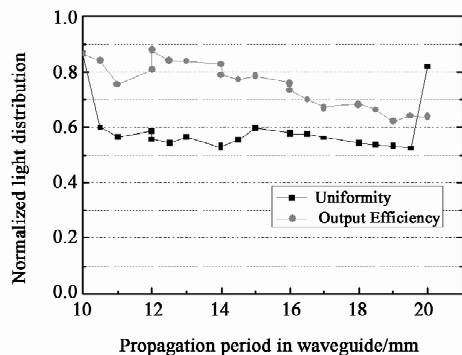


图8 大视场范围内输出光强均匀性和输出效率

Fig. 8 Output intensity uniformity and output efficiency within the large field of view

传输区采用单层分束膜时,在单次衍射输出光束宽度范围内,重叠区域光强为非重叠区域光强的2倍,所以任意视场输出均匀性不小于50%。通过优化光栅衍射效率,在 $\Delta \in [10, 20]$ mm范围内,均匀性最小为52.4%,由于传输周期逐渐增大,图像光经输出光栅衍射次数减小,因此输出效率逐渐降低。为了进一步提高输出均匀性,传输区采用两层分束膜,在单次衍射输出光束宽度范围内,重叠区域光强密度与非重叠区域相差1/3,所以任意视场输出均匀性不小于66.7%。

理论上,当分束膜的层数足够多时,输出均匀性可以接近100%。

4 结 论

对于全息波导显示系统,为了实现大视场、大出瞳输出以及整个出瞳的连续,需要在传输区增加半透半反膜。然而,半透半反膜的引入又导致入射到输出光栅上的光束出现重叠区和非重叠区,在波导内沿传输方向的强度分布产生阶跃变化。为了保证输出像的质量,整个出瞳光强分布须达到一定的均匀性。为此,建立了确定光栅衍射效率分布数学模型,由中心视场光束得到严格相等的输出光强分布,并由此计算输出光栅衍射效率呈阶跃形分布,对阶跃形衍射效率分布进行加权平均并作二次曲线拟合,得到连续递增的输出光栅衍射效率分布,并由此计算得到各种传输视场的输出光强分布。

对于单层分束膜,输出重叠区和非重叠区光强相差1/2,所以其位置均匀性最小为50%,考虑到实际输出光栅衍射效率曲线,实际均匀性最小为52.4%。对于双层分束膜,重叠区域光强与非重叠区域光强相差1/3,所以任意视场输出均匀性不小于66.7%。因此,增加传输区分束膜层数,可以减小重叠区和非重叠区强度差异,可以有效提高输出均匀性。全息波导二维扩展过程实质上是两个一维扩展过程的组合,因此可将一维扩展全息光栅衍射效率求解方法和结果应用于二维扩展过程,从而可以得到二维扩展输出图像的均匀性。

参 考 文 献:

- [1] Huang Q, Gilbert J A. Diffraction properties of substrate guided-wave holograms [J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(10): 2891-2899.
- [2] 彭飞, 杨德兴, 张攀, 等. 多重结构对体全息光栅衍射角带宽的拓展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(9): 46-50. Peng F, Yang D X, Zhang P, et al. Broaden the diffraction angular bandwidth of volume holographic grating by multiplex structures [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(9): 46-50. (in Chinese)
- [3] Cameron A. The application of holographic optical waveguide technology to the Q-Sight family of helmet-mounted displays [C]. *Proc. SPIE*, 2009, 7326: 0H1-0H11.
- [4] 徐迈. 集成光学波导光栅研究进展 [J]. 发光学报, 2005, 26(4): 415-425. Xu M. Research progression waveguide gratings for integrated optics [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2005, 26(4): 415-425. (in Chinese)

- [5] Roberts D C, Snarski S, Sherrill T, *et al.* Soldier-worn augmented reality system for tactical icon visualization [C]. *Proc. SPIE*, 2012, 8383: 838305-1-12.
- [6] Aye T M, Yu K, Tengara I, *et al.* Compact HMD optics based on multiplexed aberration compensated holographic optical elements [C]. *Proc. SPIE*, 2001, 4361: 89-97.
- [7] Hiatt K L, Rash C E, Heinecke K. Visual issues associated with the use of the integrated helmet and display sighting system (IHADSS) in the apache helicopter-three decades in review [C]. *Proc. SPIE*, 2008, 6955: 69550-1-11.
- [8] 姜洋, 孙强, 谷立山, 等. 折/衍混合自由曲面式头戴显示器光学系统设计 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(3): 508-514.
- Jiang Y, Sun Q, Gu L S, *et al.* Design of optical system of HMD using hybrid refractive/diffractive and free-form surfaces [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3): 508-514. (in Chinese)
- [9] Gurwich I, Weiss V, Eisen L, *et al.* Design and experiments of planar optical light guides for virtual image displays [C]. *Proc. SPIE*, 2003, 5182: 212-221.
- [10] Eisen L, Meyklyar M, Golub M, *et al.* Planar configuration for image projection [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(17): 4005-4011.
- [11] Whitehead L A. Uniform light extraction from light guide, independently of light guide length; U. S., 5901266 [P]. 1999-05-04.
- [12] Shechter R, Amitai Y, Friesem A A. Compact beam expander with linear gratings [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(7): 1236-1240.
- [13] Baker I A, Handerek V A. Waveguide; US, 20110026128 [P]. 2011-02-03.

作者简介:张攀(1987—),男,陕西西安人,硕士,主要从事显示与成像方面的研究。E-mail:zhp4516@163.com

杨德兴(1966—),男,陕西西安人,博士,教授,主要从事极端环境下的光纤传感技术与系统、激光超声波物理与应用等方面的研究。E-mail:dxyang@nwpu.edu.cn