

一种新型头盔显示技术——波导光学元件

鲜勇

(海军驻洛阳地区航空代表室,河南 洛阳 471000)

摘要: 基于波导技术的 LOE 是新一代准直显示技术,该技术基于波导传输原理,采用集成光学的设计理念,充分利用了波导元件的导波特性和对入射波进行调制和对出射波进行解调实现准直显示。重点介绍了 LOE 显示技术的原理,并就当前该技术的发展情况进行了阐述。

关键词: LOE; 头盔显示技术; 准直显示

中图分类号: V249.32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)07-0058-04

Light-Guide Optical Element: A Novel Technique for Helmet-Mounted Display

XIAN Yong

(Aviation Representatives Office of Navy in Luoyang, Luoyang 471000, China)

Abstract: Light-guide Optical Element (LOE) based on waveguide principle is a new generation collimation display technique. The advantages of optical waveguide in transmission are integrated into LOE technique, and collimation display is implemented by modulating incident optical waves and demodulating emergent optical waves. The principle and the development of LOE are introduced in this paper.

Key words: Light-guide Optical Element (LOE); helmet-mounted display technology; collimation display

0 引言

随着机载座舱显示技术的发展,头盔显示技术越来越显示出其巨大的应用价值和发展潜力。其中,透射式显示,尤其是护目镜透射准直显示技术,是目前该技术的主流方向,但是其光学系统笨重且占据头盔内大量空间。为了适应头盔显示器轻型化、小型化的发展趋势和要求,技术界提出了采用波导集成显示的新方法,即波导光学元件(Light-guide Optical Element, LOE)。该技术也是近年来热点研究领域,其以超轻便性、高集成性在众多目视光学仪器中都有应用,如以色列 Lumus 公司生产的 PD-18 系列头盔显示器^[1-4],美军 A10-C 攻击机的头盔显示器^[5]等,都是基于 LOE 技术开发的。其中,以色列 Lumus 公司生产的 PD-18 系列头盔显示器代表了当前波导显示发展水平,与传统的头显和平显相比,有着巨大的优势:显示出瞳(或头部运动范围)增大;中继光学系统重量、体积较小;能提供更大的显示视场;能够实现彩色显示。

本文重点介绍了 LOE 显示技术的原理,并就当前该技术的发展情况进行了阐述。

1 LOE 简介

LOE 可以作为成像透镜,并兼作组合镜使用,这种轻便的可成像无穷远的光学模块最重要的应用就是在头盔显示器上。图像源产生的图像经过中继准直系统进入 LOE,在 LOE 中经过半反射与全反射后透射于人眼。传统的头盔显示器光学系统,随着设计视场的增大,系统的重量、体积都会增加,而 LOE 技术的出现,可为大视场、彩色显示头盔显示器光学系统的设计提供一种全新的解决方案。

图 1 所示为 LOE 系统组成示意图。LOE 包含一块透明的平板光学基板,其内部植入一组半反射半透射面,由像源生成的图像耦合进入 LOE 基板,在基板内部单向进行全反射,最后在人眼观察位置经过一组半反半透面,图像经过扩展后耦合出射至人眼,从而使佩带者可以看到一幅大视场的准直图像。

由于 LOE 采用了波导传输的设计理念,所以具有超轻便性、高集成性等优点。LOE 的输出区域采用多层反射膜的结构,如图 2 所示。表 1 给出了 LOE 的一

收稿日期:2013-05-27

作者简介:鲜勇(1974—),男,四川巴中人,硕士,研究方向为航电火控技术。

些重要性能参数。

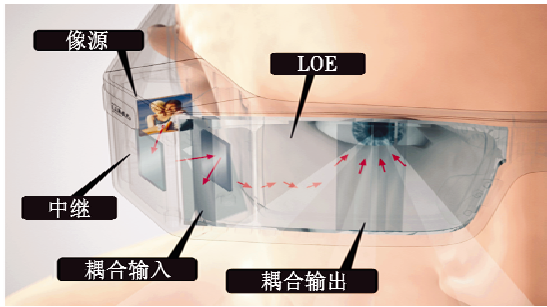


图1 LOE系统组成

Fig.1 The composition of LOE system

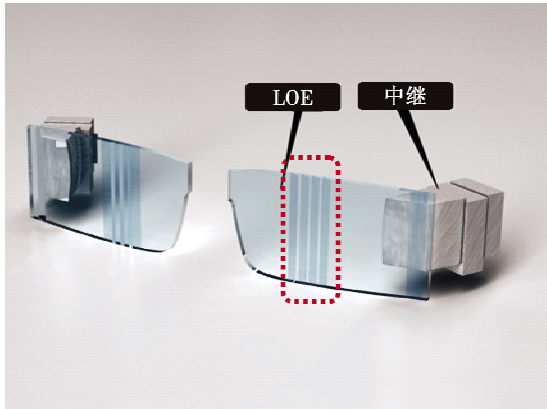


图2 LOE多层反射膜输出

Fig.2 Output of multiple reflecting surfaces in LOE

表1 LOE显示性能

Table 1 Display performance of LOE

参数	视场/(°)	出瞳孔径/mm	透过率/%	亮度/ftL
LOE	27.5	20	>70	>400

注:1 ftL=1566 lx。

2 LOE工作原理

2.1 初级折叠光学结构

为了利用波导板这种紧凑的结构传输图像,最初的想法是借鉴潜望镜原理的折叠光学系统^[1]。图3给出了这种光学系统的光线传输原理。

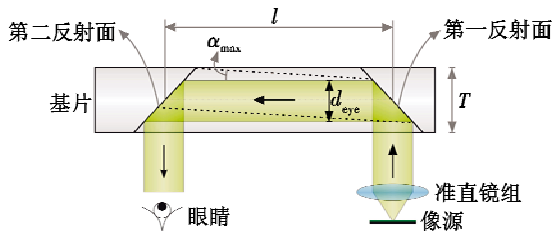


图3 初级折叠光学系统光路原理

Fig.3 The principle of folding optical system

平板像源发出的光束经过准直镜组的折射后,变为准直平行光入射到波导基片上。以平行于准直镜组光轴的主光线为例,主光线垂直入射进基片,经第一反

射面的反射,变成平行于基片的光线,然后经第二反射面的反射,从基片中垂直出射,进入人眼,第一和第二反射面的作用分别是把光束耦合进入和离开波导基片。尽管采用这种光学系统已经实现了结构紧凑的优点,但是该结构存在一些不可避免的问题,如视场范围受到限制。如图3所示,在基片中的最大离轴角度为

$$\alpha_{max} = \arctan\left(\frac{T - d_{eye}}{2l}\right) \quad (1)$$

式中: T 表示基片厚度; d_{eye} 表示需要的出瞳直径; l 为第一和第二反射面之间的距离。假如离轴角度大于 α_{max} ,那么光线在到达第二反射面之前会首先入射到基片的表面发生全发射,使角度发生改变。所以当光线进入第二反射面时由于角度发生了偏差,会导致鬼像的出现。因此该系统的最大视场为

$$F_{max} \approx 2n\alpha_{max} \quad (2)$$

式中, n 为基片的折射率。通常由于眼瞳的直径为2~6 mm,为了能够舒适地观察图像,系统的最小出瞳近似为8~10 mm,眼睛的光轴到头部边缘的距离(l)通常为40~80 mm。在这种条件下,如果要实现8°的小视场范围,基片的厚度需要达到12 mm。

2.2 LOE光学结构

为了增大视场和出瞳,LOE技术改进了初级折叠光学系统的光束直接传输和单次反射输出方式,采用了波导全反射传输和多次反射输出的方式^[1-4]。因此LOE与前述光学系统的最大区别有两点:1) 阵列选择性反射面组代替了第二反射面;2) 反射面的角度更加倾斜,如图4所示。

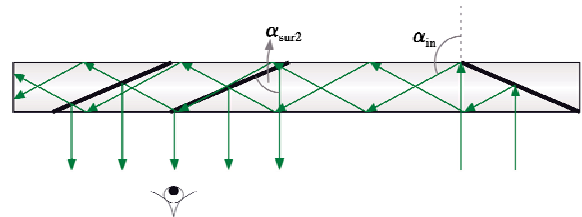


图4 LOE光路原理

Fig.4 The principle of LOE

反射面组可以使基片中的光线在多个位置经过多次反射耦合输出,能够增加出瞳直径。全反射的传输方式消除了直接传输方式的视场限制,能够增加输出视场。LOE的工作过程为:像源发出的光束经准直镜组折射后,变为准直平行光入射到波导基片上(以平行于准直镜组光轴的主光线为例),主光线垂直入射进基片,经第一反射面的反射后偏转方向,被基片上下表面限制在基片中以全反射的方式向左传输。经过基片表面的几次全反射后,光线到达阵列选择性反射面区域,经反射面组的多次反射耦合输出至观察者的眼睛。设主光线经过第一反射镜反射后的离轴角为 α_{in} ,如图4所示,那

么反射面与基片法线的夹角为

$$\alpha_{\text{out}2} = \alpha_{\text{in}}/2 \quad (3)$$

从图4可以看出,基片中的光线传输到选择性反射面时,存在两种截然不同的入射角度。第一种情况下,光线入射到选择性反射面之前与基片表面发生奇数次反射,入射角为

$$\beta_{\text{ref}} = 90^\circ - (\alpha_{\text{in}} - \alpha_{\text{out}2}) = 90^\circ - \frac{\alpha_{\text{in}}}{2} \quad (4)$$

第二种情况下,发生偶数次反射,离轴角 $\alpha'_{\text{in}} = 180^\circ - \alpha_{\text{in}}$,因此入射角为

$$\beta'_{\text{ref}} = 90^\circ - (\alpha'_{\text{in}} - \alpha_{\text{out}2}) = -90^\circ + \frac{3\alpha_{\text{in}}}{2} \quad (5)$$

两种入射角分别如图5所示,其中,第一种情况的反射光线方向垂直于基片表面,实现了耦合输出的功能,第二种情况的反射光线方向离轴角度更大,受全反射限制无法耦合输出,在基片内产生了一个新的光线方向,会导致鬼像。

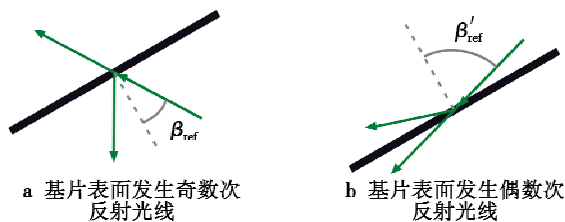


图5 两种反射情况

Fig. 5 Two reflecting cases

为了避免鬼像的产生,需要有选择性地保留第一种反射和消除第二种反射,这也是输出耦合采用选择性反射面的原因。从图5可以看出,两种入射角度像差较大,这给选择性反射带来了契机。假如离轴角 α_{in} 取 130° ,根据式(4)和式(5)可得, $\beta_{\text{ref}} = 25^\circ$, $\beta'_{\text{ref}} = 105^\circ$ (等效于 75°)。如果选择性反射面在入射角为 25° 附近具有部分的反射能力,在入射角为 75° 附近几乎不反射,那么就可以消除鬼像。基于这种需求,图6给出了采用镀膜技术实现的选择性反射面的反射效率曲线。

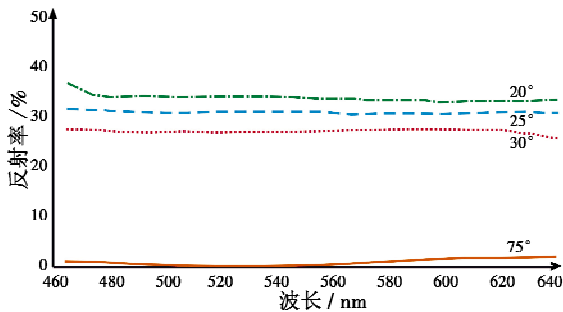


图6 选择性反射面的反射特性

Fig. 6 Reflective performance of selectively reflecting surface

3 国外 LOE 技术的发展

3.1 军事应用

早在2007年,美国国家防空与空军储备测试中心(AATC)提出原有的联合头盔指示系统(JHMCS)已不能满足A-10C攻击机的使用要求,需要开发一种新型头盔瞄准显示系统(HMCS),Gentex公司与洛克希德-马丁公司联合承担了这项研制工作,并提出了一种采用全新技术的彩色投影显示系统,完全不同于仅能显示单色(绿色)图像或视频的传统平视显示器与头盔显示器,被称为天蝎(Scorpion)头盔瞄准显示系统^[3]。目前,第一代Scorpion HMCS正在接受作战评估测试,第二代Scorpion HMCS正在接受气流吹袭实验。Scorpion HMCS的显示组件被称为天蝎显示模块(Scorpion Display Module,SDM),如图7a所示,是基于LOE技术开发的新型显示器,用以替代原有厚重的曲面组合镜。SDM使用彩色硅基液晶显示器(LCOS)作为图像源,飞行员可看到全彩色的图像与视频信息。图7b为加装夜视镜后的效果图。

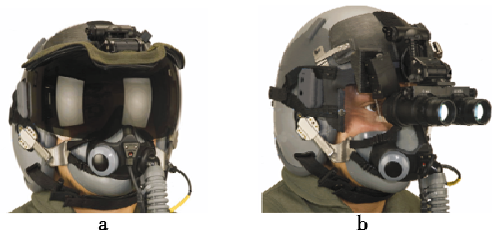


图7 Scorpion HMCS 头盔瞄准显示系统

Fig. 7 Scorpion HMCS helmet-mounted display system

以色列最新推出的PD-18显示器^[5],如图8所示,可实现全彩色,高亮度,达到SVGA(800×600)分辨率显示,上下半框架结构设计,由于无底边框遮拦,对周边视觉不造成影响,作为一种增强现实型显示装置,非常适合在头盔设备上安装使用。PD-18显示器技术指标如表2所示。



图8 Lumus Professional PD-18 显示器

Fig. 8 Lumus Professional PD-18 display

表2 PD-18 显示器技术指标
Table 2 The display index of PD-18

视场/(°)	分辨率/像素	出瞳孔径/ mm ²	出瞳距/ mm	使用区域 透过率/%
27	SVGA 800 × 600	∅ 20	>23	>70
非使用区域 透过率/%	颜色显示	重量(显示 模块)/g	LOE 厚 度/mm	亮度/ftL
>92	全彩色	<70	2.3	>400

3.2 民用产品

Lumus 公司推出的 Video Eyeglasses 系列产品,如图 9 所示。



图9 Lumus Video Eyeglasses 系列产品
Fig.9 Series of Lumus Video Eyeglasses

在 2010 年下半年投入销售市场。Video Eyeglass 是一款娱乐型显示产品,采用虚拟显示技术。系统由两个显示像源与两块 LOE 透镜组成,图像源产生的图像通过 LOE 透镜成像;用户可在眼前看到放大的显示画面,效果相当于在 3 m 远的地方观看 60" 的显示屏,使用者相当于将一台电视带在身边。用户可通过此产品看视频,减轻因观看过小的显示画面(如 MP4、PSP 等)而产生的眼疲劳。图 10 给出了该产品的典型画面。

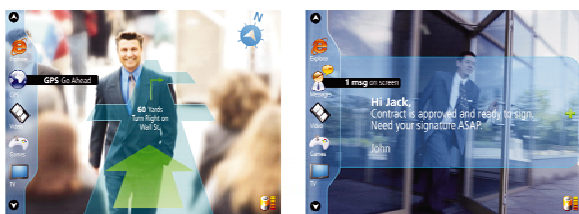


图10 Lumus Video Eyeglasses 产品的显示画面
Fig.10 Display frame of Lumus Video Eyeglasses

Video Eyeglasses 系列产品的性能指标如表 3 所示。

表3 Video Eyeglasses 系列产品的性能指标
Table 3 The display index of series of Video Eyeglasses

分辨率/像素	视场/(°)	出瞳孔径/mm ²	颜色显示	透过率/%
VGA 640 × 480	27.5	10 × 10	全彩色	>70
亮度/ftL	对比度	出瞳距/mm	重量/g	LOE 厚度/mm
>400	>100:1	22	<100	2

由于采用了扩展出瞳和增大视场技术,因此其显示范围和观察范围比仅采用单个反光棱镜的谷歌眼镜大得多,显示质量也高很多。

4 结论

头盔显示器系统是一项涵盖和涉及多个学科的高技术含量的综合系统工程,任何一款头盔显示器都是各类先进技术成果的结晶。目前普遍采用目镜与护目镜组合的光学系统结构,由于占据较大空间和系统重量,严重制约了头盔显示器朝着轻型化、小型化发展。

LOE 显示技术是未来发展的趋势,可以实现小型化、轻型化和全彩色显示,通过结构改进可以消除鬼像,增加视场、降低厚度。尽管目前技术还不够成熟,但是随着科学技术的发展以及科研工作者的努力,一定能够实现显示系统的小型化、轻型化、高亮度、高透过率、大视场、低成本等目标,成为透射式头盔显示器未来发展的主流。

参考文献

- [1] AMITAI Y. Substrate-guided optical beam expander[P]. United States Patent, 2004, US 6829095 B2.
- [2] AMITAI Y. Light guide optical device[P]. United States Patent, 2008, US 7457040 B2.
- [3] AMITAI Y. Optical device for light coupling[P]. United States Patent, 2009, US 7577326 B2.
- [4] AMITAI Y. Substrate-guided optical device with wide aperture[P]. United States Patent, 2010, US 7643214 B2.
- [5] ATAC R. Low-cost helmet-mounted cueing system for A-10C[J]. Proceeding of SPIE, 2009, 7326:732608.
- [6] 杨鹏. 改进的数学形态学小波图像融合算法[J]. 计算机仿真, 2011, 28(2): 288-291.
- [7] 秦襄培. MATLAB 图像处理与界面编程宝典[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 264-273.
- [8] KRAMER J D, REID W S. Track-before-detect processing for a range-ambiguous radar[C]//IEEE National Radar Conference, New York, NY, 20-22, April, 1993, 0-7803-0934-0, 4595885:113-116.

(上接第 48 页)

- [6] WU Z H, SHI Z S, SHI Z M, et al. An simulation method of sensor clutter plots elimination using statistical characteristics analysis[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 170-173:3345-3348.
- [7] 王国宏, 苏峰, 何友, 等. 三维空间中基于 Hough 变换和逻辑的航迹起始[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(10): 2198-2220.