

## 机载全息波导瞄准显示技术发展综述

王先超<sup>1</sup>, 谢意<sup>2</sup>

(1. 海军驻洛阳地区航空军事代表室, 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)

**摘要:** 首先阐述了机载全息波导瞄准显示技术的概念和内涵, 说明了其技术特征和优势, 介绍了该技术目前的国内外研究现状。分析了机载全息波导瞄准显示涉及到的关键技术, 并对各关键技术进行了说明。在此基础上, 分析了机载全息波导瞄准显示技术的发展趋势和未来的突破口, 最后, 对该项技术进行了展望。

**关键词:** 机载显示系统; 全息波导; 瞄准显示; 眼盒; 综述

**中图分类号:** V271.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2015)12-0067-05

## Development of Aviation Waveguide Holographic Sighting Display Technology

WANG Xian-chao<sup>1</sup>, XIE Yi<sup>2</sup>

(1. Aviation Delegate Office of Navy in Luoyang District, Luoyang 471000, China;

2. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China)

**Abstract:** The concept of airborne waveguide holographic sighting display technology is introduced with its technical features and advantages, and the current situation of researches on this technology is summarized. Analysis is made to the critical technologies of the waveguide holographic sighting display and each of the critical technologies. Based on which, the development tendency and prospects of the waveguide holographic sighting display technology in the future are presented.

**Key words:** onboard display system; waveguide holographic; sighting display; eye box; survey

### 0 引言

机载瞄准显示技术是指用于显示飞机瞄准攻击和导航信息的透视显示技术。观察者使用瞄准显示设备时, 能够同时观察目标信息和叠加在上面的瞄准信息以及其他传感器提供的关键信息。机载瞄准显示技术在现代战机中发挥着重要作用, 依靠该技术, 飞行员能够在观察外景的同时无须低头即可观察到载机的关键信息, 如飞行导航、武器状态、威胁告警等。采用机载瞄准显示技术的设备有平视显示器和头盔显示器。借助平视显示器, 飞行员可以实现平视飞行、握杆操纵, 大幅减轻飞行负担<sup>[1]</sup>。装备头盔瞄准显示系统的先进战机可以实现制导武器的离轴发射, 实现发现即瞄准、瞄准即截获, 有力提高了战机的作战效能<sup>[2-4]</sup>。传统

的机载瞄准显示系统采用的是投射式显示原理, 系统视场、眼盒等关键性能提升是以系统体积、重量成倍增加为代价的。对飞机的座舱安装空间要求苛刻, 同时, 笨重的头盔显示器对飞行员的颈部造成了非常沉重的负担, 在飞行员高速弹射时存在生命安全隐患。

全息波导瞄准显示技术通过采用集成化的全息波导元件, 依靠全息光栅的衍射分光, 实现对光能信息的逐次分配, 在增大系统眼盒的同时可以大幅减轻系统重量, 减小体积, 在机载瞄准显示领域具有广阔的应用前景。

### 1 概念和内涵

如图1所示, 由像源发出的光波经准直成像消像差后, 通过耦合器件耦合进入波导区。入射到全息膜后, 部分光能衍射耦合出射, 成像于无穷远处, 剩余光能则继续在波导区按“Z”字路线传输, 并在下一区继续衍射和传输, 由全息膜和波导共同构成一个具有大观察范围、小体积的光学成像器件, 通过波面转换完成成像显示<sup>[5]</sup>。

收稿日期: 2015-09-01

修回日期: 2015-10-23

基金项目: 航空科学基金(20135169016)

作者简介: 王先超(1971—), 男, 河南淮阳人, 硕士, 高工, 研究方向为航空军械质量监督及技术。

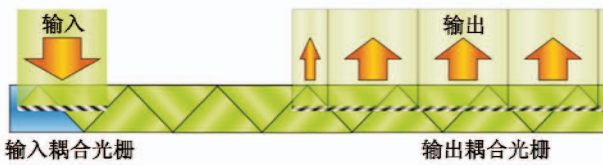


图1 全息波导显示原理

Fig. 1 Principle of holographic optical waveguide display

全息波导显示技术可以实现小体积、轻重量和大观察范围显示:1)光学系统简洁,准直光学透镜口径小,采用集成化的全息波导元件,可将光学系统重量减轻50%;2)光波传输过程中损失少,光能利用率提高30%;3)同一视场光线在整个全息波导器件上经多次衍射后显示,观察范围可提高2倍以上。

图2以头盔显示器为例,对比了传统头盔显示器和全息波导头盔显示器的光路图。从图中可以看出,全息波导头盔显示器采用集成化的全息波导元件,在减少元件数量的同时,可以大幅增大系统出瞳(眼盒)。

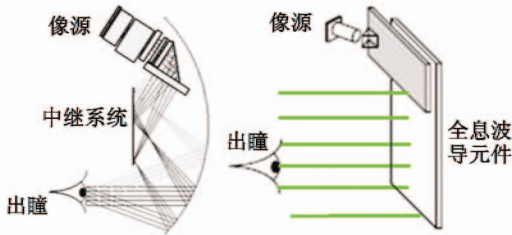


图2 传统头盔显示与全息波导头盔显示对比

Fig. 2 Conventional visor projected HMD and waveguide HMD constructions

## 2 研究现状

### 2.1 国外研究现状

BAE 公司从事全息波导瞄准显示技术研究已有约20年,是从事全息波导瞄准显示技术研究的领跑者。经过10年左右的技术积累,于2007年11月,首次公开报导了研制的Q-Sight 100全息波导头盔显示器,引起业界震惊,这也成为了全息波导显示技术在机载瞄准显示领域应用的里程碑<sup>[5-7]</sup>。截止目前,BAE公司产品日趋丰富,涵盖了机载单、双目头盔显示器和单兵头盔显示器,并于2013年底研制出彩色全息波导头盔显示器<sup>[8]</sup>。全息波导头盔显示器已有部分产品进行了试飞并获得了装备,如图3所示。



图3 BAE 全息波导头盔显示器

Fig. 3 Waveguide holographic HMD of BAE systems

BAE 公司研制的全息波导平视显示器(见图4)于2013年在范堡罗航展上进行了首次展出,系统体积较传统的平视显示器大幅缩小<sup>[8-9]</sup>。该型平视显示器的主要显示性能指标如下:视场为 $25^{\circ} \times 20^{\circ}$ ;分辨率为1280像素 $\times$ 1024像素;字符亮度为2000 ft/L。

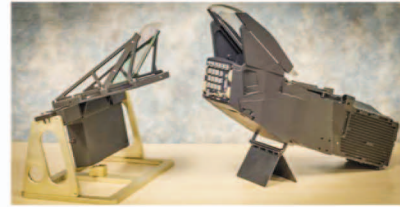


图4 BAE 全息波导平视显示器

Fig. 4 Waveguide holographic HUD of BAE systems

日本 SONY 公司早在2009年就推出了其研制的全息波导型透视眼镜 Eyeglass,直到2014年才正式将 Smart Eyeglass 推向市场。该眼镜采用光致聚合物作为全息记录材料,其视场为 $19^{\circ} \times 6^{\circ}$ ,分辨率419像素 $\times$ 318像素,亮度1000 cd/m<sup>2</sup>,重量77 g,绿色显示(见图5)。



图5 Sony Smart Eyeglass 全息波导显示

Fig. 5 Sony Smart Eyeglass

韩国 Chungbuk 大学也先后报导了其在全息波导显示领域的研究进展,该大学朴美兰等人采用 Bayfol HX 光致聚合物作为全息记录材料,开发了彩色全息波导显示系统<sup>[10-11]</sup>,如图6所示。



图6 Chungbuk 大学全息波导显示效果

Fig. 6 Waveguide holographic display technology of Chungbuk University

### 2.2 国内研究现状

目前,国内的全息波导瞄准显示技术处于起步阶段,主要开展了系统设计和原理验证实验。

国内某些大学侧重于彩色全息波导显示技术研究,选用的全息记录材料为光致聚合物,这种材料具有感光快、无须化学处理等优点,但是温度变化会对显示效果造成非常显著的影响。图7为两个彩色全息波导显示实验的结果<sup>[12-13]</sup>。



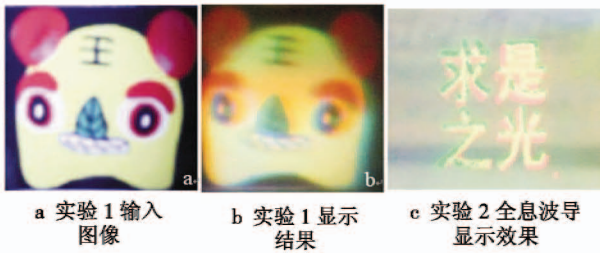


图 7 全息波导显示实验

Fig. 7 Waveguide holographic display experiment

国内某研究所也曾开展全息波导头盔显示技术研究,在光学系统设计、仿真方面进行了大量的研究工作,设计出视场为  $20^\circ \times 20^\circ$ , 出瞳为  $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  的显示系统<sup>[14]</sup>。

### 3 关键技术

全息波导瞄准显示技术涵盖了光学、数学、化学、机械、电子等诸多专业,涉及的关键技术主要有以下几项。

#### 3.1 系统总体设计技术

系统总体设计技术涉及全息波导瞄准显示系统在座舱或盔体内的空间布局,尤其对头盔显示器显得更为重要。对于歼击机头盔显示器,空战中近距离格斗需要飞行员驾驶战机进行大机动过载,如英国台风战机可进行  $9g$  过载机动。现代战斗机飞行员佩戴的头盔由于附加了瞄准显示系统,使得头盔瞄准显示系统重量增加,导致飞行员颈部承受的重量加剧,做大机动过载动作时易发生生命危险。因此,全息波导头盔瞄准显示系统应该比传统头盔瞄准显示系统具有更优的空间布局,以减轻显示组件对头盔瞄准显示系统重心偏移的影响。此外,全息波导瞄准显示系统还必须有良好的外形,以避免飞行员弹射时高速气流吹袭造成颈部拉伤。同时,全息波导瞄准显示属于目镜式显示,总体设计需要考虑如何与护目镜衔接,避免元件对飞行员造成伤害。

#### 3.2 大视场光学系统设计技术

光学设计常用的设计软件有 CODE V 和 ZEMAX 等,这些软件采用的计算公式默认体全息两侧为空气介质(非波导介质),全息波导瞄准显示光学系统设计仅靠现有的上述商用软件难以完整地系统完成设计工作。为此,BAE 公司独立开发了专用设计软件,该软件在 ZEMAX 等软件设计的基础上,能够完成系统光线追迹和光学性能计算。

显示视场是瞄准显示系统的一个关键技术指标。理论上,视场与波导材料折射率直接相关,折射率越大,视场越大,但波导材料折射率有限,仅靠选取折射率高的材料增大视场作用有限,增大系统视场还须从以下两个方面入手。

1) 改变系统构型。构型合适是设计结果理想的

前提。BAE 公司先后提出了 3 种构型,即双波导片式、波导杆 + 波导板式、单片式(见图 8),这 3 种构型的视场等性能指标逐步提高。尤其是单片式构型,目前已经能够实现  $50^\circ \times 30^\circ$  的视场。

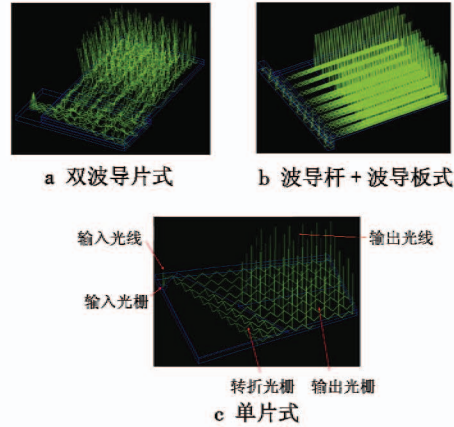


图 8 3 种系统结构

Fig. 8 Three different configurations

相比前两种构型,单片式全息波导元件可以进一步减轻系统重量,减小系统体积,同时由于避免了光波在不同全息波导元件之间的耦合,可以有效提高能量利用率。采用该技术的全息波导头盔显示器具有系统体积小、质量轻、亮度高的优点,系统人机工效好。

2) 改变光栅结构。全息波导显示依靠光栅的分光作用,实现了对能量的逐次再分配。通过改变光栅结构,可以在一定程度上压缩边缘视场的衍射角度差,增大波导对不同衍射角度光线的约束能力,从而增大系统视场。

#### 3.3 均匀显示技术

均匀显示涉及两方面内容,即位置均匀显示技术和角度均匀显示技术。如图 9 所示,位置均匀显示技术指同一方向信息在不同位置的显示亮度均匀性。为保证位置均匀性满足国军标要求,需要严格控制全息波导光栅在不同位置的衍射效率。

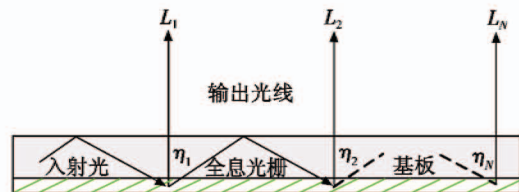


图 9 位置均匀性

Fig. 9 Illumination uniformity of different regions

如图 10 所示,角度均匀性是指在同一观察位置,不同视场(角度)显示信息的亮度一致性。不同类型的全息光栅具有不同的角度选择性,如对体全息光栅,其角度选择性比较小,偏离布拉格角度的光线衍射效率急剧下降,难以满足大视场显示需求,需要进行角带宽拓展。



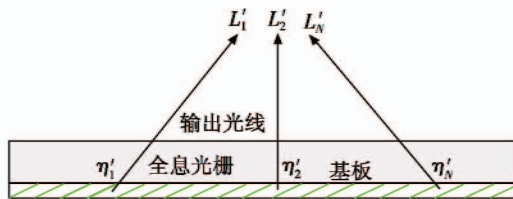


图10 角度均匀性

Fig. 10 Illumination uniformity of different angles

因此,机载全息波导瞄准显示需要统筹考虑位置均匀性和角度均匀性,既需要对不同位置的全息光栅衍射效率进行优化,又需要对全息光栅的衍射角带宽进行拓展。

### 3.4 高亮像源技术

机载瞄准显示系统可以选用的像源主要有 CRT, LCD, OLED, LCoS 等,其中, LCD 正在逐步替代 CRT 成为主流像源。对于全息波导瞄准显示系统,能量通过全息波导元件进行了一定空间范围内的多次分配,根据能量利用率分析,单次显示的能量利用率仅为像源出射能量的 3% ~ 5%,因此,该型系统对像源的基本要求是高亮。LCoS 像源采用高亮 LED 或激光作为背光照明,可以实现数倍于 LCD 的亮度,适用于全息波导头盔显示器。BAE 公司采用 Jasper 公司生产的 0.55 in (1 in = 2.54 cm) LCoS 像源,其分辨率为 1920 像素 × 1080 像素,背光则选用了 Imagine 公司的 PT54 525 nm LED。目前,BAE 公司正在研制 0.7 in,分辨率为 4096 像素 × 2400 像素的超高分辨率 LCoS 像源。对于全息波导平视显示器,BAE 公司则选用了 DMD 像源,相比 CRT, LCD, OLED 和 LCoS 像源, DMD 像源采用 Nd-Yag 激光作为光源,其亮度可以达到 LCD 像源的 20 倍,具有高亮、结构紧凑、分辨率高的优点,适用于全息波导平视显示器。

### 3.5 全息波导元件制备技术

全息波导元件作为系统的核心组件,其制备不同于衍射平视显示器上的全息组合镜,环境因素和曝光参数对元件的性能影响较大。BAE 公司在进行原理验证研究阶段,选用了衍射效率高、技术上成熟的重铬酸盐明胶(DCG),之后随着技术的不断进步,采取“压印”批量复制的技术,不仅可以提高生产效率,也保证了元件的一致性。目前,BAE 公司采用“压印”技术批量复制的单片式全息波导元件已经成功应用于机载头盔瞄准显示系统上。日本 SONY 公司和韩国 Chungbuk 大学虽然也开展了全息波导头盔显示元件制备技术研究工作,但采用的全息记录材料均为光致聚合物,这类材料具有曝光时间短、感光度高、无需化学处理的优点,但也存在外景透过率偏低、光能吸收严重等问题,并且对温度变化较为敏感,不适用于机载瞄准显示器应用。

## 4 发展趋势

自 2007 年底 BAE 公司首次将全息波导显示技术应用于头盔显示器后,该项技术已经日益引起世界各航空军事大国从事机载瞄准显示系统研制单位的重视。美军 F-35 飞机拟列装的 G II 头盔显示器由于存在短时间内难以解决的问题,将 BAE 公司的方案列为备选对象。相信在不久的将来,随着技术的不断进步,全息波导瞄准显示技术必将在陆、海、空三军取得广泛应用。

根据技术特征分析,全息波导显示属于目镜式显示,该技术未来将首先在武装直升机上取得应用,取代传统型头盔显示器和平视显示器,在减轻飞行员颈部负担的同时,增大系统眼盒,减小系统安装空间。由于歼击机飞行员要驾驶战机做出大过载机动飞行,且面对威胁生命安全问题时需要高速弹射出舱,因此,歼击机头盔显示器需要采用护目镜式显示。全息波导显示技术未来将结合歼击机的特殊使用要求,实现元件和护目镜的集成。此外,全息波导显示技术还将应用于大型军用运输机,取代吊装式平视显示器,大幅缩小座舱安装空间。

## 5 结束语

全息波导瞄准显示技术依靠集成化的全息波导元件,在实现显示信息空间逐次分布的同时,大幅减轻光学系统重量,增大系统眼盒,有利于提高飞行员的战场态势感知能力,减轻飞行员驾驶疲劳,提高作战效能。全息波导瞄准显示技术从原理上颠覆了传统的瞄准显示技术,随着技术的不断进步,未来必将取得广泛的应用,产生显著的军事、经济效益。相信在不久的将来,国内对机载瞄准显示设备的研究也将取得长足发展,从而缩短与军事发达国家的差距。

## 参考文献

- [1] 王立伟,汪建甄. 国外军用飞机平视显示器的发展[J]. 红外与激光工程, 2007( s2 ): 578-582. ( WANG L W, WANG J Z. Development of HUDs on military aircraft in advanced countries [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007( s2 ): 578-582. )
- [2] 王永生. 机载头盔瞄准显示系统动态性能研究[J]. 电光与控制, 2013, 20( 8 ): 1-5. ( WANG Y S. On dynamic performance of airborne helmet-mounted display and sight system [J]. Electronics Optics & Control, 2013, 20( 8 ): 1-5. )
- [3] 王永生,刘红漫. 机载头盔瞄准显示系统的人机工效综述[J]. 电光与控制, 2014, 21( 7 ): 1-5. ( WANG Y S, LIU H M. A summary on human / system performance of airborne HMSDS [J]. Electronics Optics & Control, 2014,

- 21(7):1-5.)
- [4] 赵雁雨,曹良才.头盔显示器技术发展综述[J].测试技术学报,2011,25(6):559-562. (ZHAO Y Y, CAO L C. The development of helmet mounted display: a review [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2011, 25(6):559-562.)
- [5] CAMERON A. 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: Design and Applications, 2009. doi:10.1117/12.818581.
- [6] WISELY P L. Head-up and head-mounted display performance improvements through advanced techniques in the manipulation of light [C]//Proceedings of SPIE, Displays Technology and Applications for Defense, Security and Avionics III, 2009. doi:10.1117/12.818425.
- [7] CAMERON A. Optical waveguide technology & its application in head-mounted displays [C]//Proceeding of SPIE, Display Technology and Applications for Defense, Security and Avionics VI, 2012. doi:10.1117/12.923660.
- [8] CAMERON A. "Head Up and Eyes Out" advances in head mounted displays capabilities [C]//Proceedings of SPIE, Display Technology and Applications for Defense, Security and Avionics VII, 2013. doi:10.1117/12.2021135.
- [9] HOMAN M. The use of optical waveguides in Head-Up Display (HUD) applications [C]//Proceedings of SPIE, Display Technology and Applications for Defense, Security and Avionics VII, 2013. doi:10.1117/12.2014513.
- [10] PIAO J A, LI G, PIAO M L, et al. Full color holographic optical element fabrication for waveguide-type head-mounted display using photopolymer [J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2013, 17:242-248.
- [11] PIAO J A, KIM N. Achieving high levels of color uniformity and optical efficiency for a wedge-shaped waveguide headmounted display using a photopolymer [J]. Applied Optics, 2014, 53(10):2180-2186.
- [12] SHI R, LIU J, ZHAO H Z, et al. Chromatic dispersion correction in planar waveguide using one-layer volume holograms based on three-step exposure [J]. Applied Optics, 2012, 51(20):4703-4708.
- [13] 刘辉. 基于平板波导的头盔显示技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012. (LIU H. Research on head-mounted display based on planar optical waveguide [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.)
- [14] 曾飞, 张新, 张建萍, 等. 基于棱镜-光栅光结构的全息波导头盔显示系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(9):122-127. (ZENG F, ZHANG X, ZHANG J P, et al. Holographic waveguide head-mounted display system design based on prisms-grating structure [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9):122-127.)

(上接第 53 页)

#### 4 结束语

本文针对 OFDM 信号与常见的单载波信号识别的问题,提出了基于同步压缩小波变换的调制类型识别算法,提取变换后的小波脊线和小波骨架信息并构造 3 个特征值对 4 类不同调制类型信号进行类间识别。通过实验仿真,验证了本算法在 0 dB 的瑞利-加性高斯白噪声信道下 OFDM 信号的正确识别率可达到 100%,其他单载波信号的正确识别率也达 90% 以上。相比同类算法,本文算法在低信噪比条件下有更好的识别效果,另外本文还讨论了不同小波函数对算法识别率的影响。不足之处是同步压缩小波变换计算过程较为复杂,简化算法是下一步研究的重点。

#### 参考文献

- [1] 樊昌信,曹丽娜.通信原理[M].北京:国防工业出版社,2012. (FAN C X, CAO L N. Communication principle [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.)
- [2] HO K C, PROKOPIW W, CHAN Y T. Modulation identification of digit wavelet transform [J]. IEEE Proceeding of Radar, Sonar, Navigation, 2000, 147(4):169-176.
- [3] LIANG H, HO K C. Identification of digital modulation types using the wavelet transform [C]//Military Communication Conference, 1999:427-431.
- [4] 王玉婧,王亚平,赵林婧.基于支撑向量机的调制制式识别算法[J].现代电子技术,2007(4):192-194. (WANG Y J, WANG Y P, ZHAO L J. Identification of modulation signals based on SVM [J]. Modern Electronic Technique, 2007(4):192-194.)
- [5] 张传忠,段田东,刘世刚,等.基于小波脊线的 OFDM 与单载波信号识别[J].信号处理,2011,21(7):1100-1105. (ZHANG C Z, DUAN T D, LIU S G, et al. Recognition of OFDM and single carrier digital signals based on wavelet ridge [J]. Signal Processing, 2011, 21(7):1100-1105.)
- [6] DAUBECHIES I, LU F J, WU H T. Synchrosqueezed wavelet transforms: an empirical mode decomposition like tool [J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2011, 30:243-261.
- [7] 潘加松.小波脊线提取方法研究及其应用[D].南京:南京航空航天大学,2014. (PAN J S. Research on wavelet ridge extraction method and its applications [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.)