

一种弱化莫尔条纹的狭缝光栅 LED 屏 裸眼 3D 显示器

胡建青^{**}, 赵悟翔, 马晓莉, 王琼华^{*}

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

摘要 常规垂直狭缝光栅和倾斜狭缝光栅的发光二极管(LED)屏裸眼 3D 显示器分别存在明显的莫尔条纹和立体图像串扰等问题,为此,提出一种弱化莫尔条纹的狭缝光栅 LED 屏裸眼 3D 显示器,它由 LED 屏和错位非均宽透光条的狭缝光栅构成。该狭缝光栅根据 LED 屏黑矩阵较宽的特点,通过适当增大透光条宽度和移动透光条在其周期中的位置,来增加狭缝光栅周期结构与 LED 屏像素周期结构之间的差异,降低莫尔条纹中暗带的对比度,并使莫尔条纹变得稀疏,从而达到既能弱化莫尔条纹,又不会明显增加立体图像串扰的目的。制作了所提狭缝光栅 LED 屏裸眼 3D 显示器样机,获得了莫尔条纹显著弱化、无明显立体图像串扰的显示效果,验证了理论的正确性。

关键词 光学器件; 裸眼 3D 显示器; 狭缝光栅; 莫尔条纹; 发光二极管屏; 黑矩阵

中图分类号 TN27

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1012002

A Naked-Eye 3D LED Display Based on a Parallax Barrier with Weak Moiré Fringes

Hu Jianqing^{**}, Zhao Wuxiang, Ma Xiaoli, Wang Qionghua^{*}

School of Electronic and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

Abstract There are obvious moiré fringes and crosstalk in the stereo images of a naked-eye 3D light-emitting diode (LED) display based on a conventional vertical parallax barrier and a slant parallax barrier, respectively. To solve these problems, we present a naked-eye 3D LED display based on a parallax barrier with weak moiré fringes. The naked-eye 3D LED display comprises an LED display and a malposed parallax barrier with discrepant slit widths. The proposed parallax barrier can match the LED displays that have a wide black matrix. We properly enlarge the width of the slits and slightly move the slits in their periods. This method can increase the difference between the periodic structures of the parallax barrier and the pixels of the LED display, which reduces the contrast ratio of the moiré fringes and causes them to appear sparsely. In this way, the weakened moiré fringes are not obvious and the crosstalk of the stereo images does not noticeably increase. We develop a prototype of the proposed naked-eye 3D LED display based on the parallax barrier. The prototype had the weakened moiré fringes, and its crosstalk is insignificant. Thus, the validity of our theory is confirmed.

Key words optical devices; naked-eye 3D display; parallax barrier; moiré fringes; light-emitting diode (LED) display; black matrix

OCIS codes 120.2040; 050.2770; 230.1360; 120.4120

1 引 言

裸眼 3D 显示技术不需要佩戴诸如立体眼镜等助视设备,是当前显示领域研究的热点^[1-4]。其中,狭缝光栅液晶裸眼 3D 显示器因结构简单、容易实现和成本低廉,已成为较成熟的产品^[5-9]。但是液晶显示屏的亮度还不足以使其在室外应用,且其尺寸

难以做得很大。发光二极管(LED)屏由于具有高亮度、大尺寸等特点而适合用于大屏幕高亮度显示场合,所以狭缝光栅 LED 裸眼 3D 显示器受到了人们的青睐^[10-14]。

狭缝光栅 LED 裸眼 3D 显示器中的常规垂直狭缝光栅的透光条与 LED 显示屏的列像素通常是平行摆放着^[15-16],当眼睛通过透光条看到相邻子像

收稿日期: 2018-04-18; 修回日期: 2018-05-16; 录用日期: 2018-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(61535007,61505128)

^{*} E-mail: qhwang@scu.edu.cn; ^{**} E-mail: jqhu1992@foxmail.com

素之间不发光的黑矩阵时,一般会观看到明显的呈周期性黑白渐变的条纹,即莫尔条纹^[17-18],这会严重影响观看效果。如果采用斜置狭缝光栅,就可以减轻莫尔条纹,但是会明显增加立体图像的串扰^[19-21]。为此,本文提出一种弱化莫尔条纹的狭缝光栅 LED 裸眼 3D 显示器,该裸眼 3D 显示器由 LED 屏和错位非均宽透光条的狭缝光栅构成。该狭缝光栅根据 LED 屏黑矩阵较宽的特点^[22],通过适当增大透光条宽度和移动透光条在其周期中的位置,来增加狭缝光栅周期结构与 LED 屏像素周期结构之间的差异,以此来降低分光元件和显示屏的相关性^[23],进而降低莫尔条纹中暗带的对比度,并使莫尔条纹变得稀疏,从而达到既能弱化莫尔条纹,又不会明显增加立体图像串扰的目的。

2 结构和原理

如图 1 所示,提出的弱化莫尔条纹的狭缝光栅 LED 裸眼 3D 显示器由 LED 屏和错位非均宽透光条的狭缝光栅构成。该 3D 显示器的视点数为 K ,狭缝光栅到 LED 屏的距离为 D ,周期为 T ,最佳观看距离为 S ,相邻视点间距按照人类的平均瞳距设为 e 。

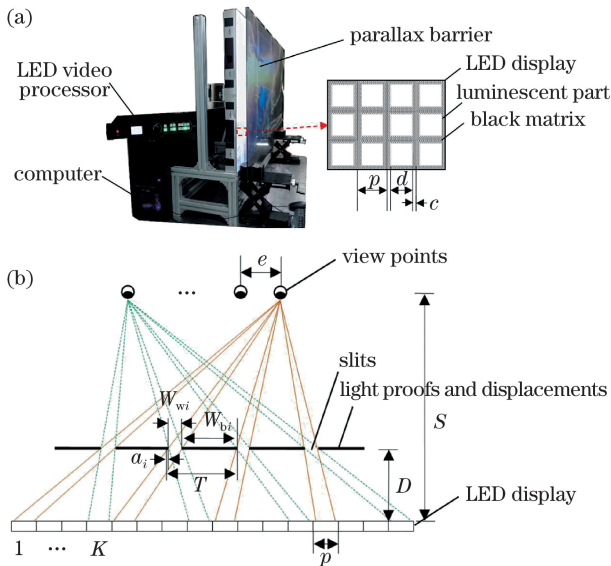


图 1 提出的弱化莫尔条纹的狭缝光栅 LED 裸眼 3D 显示器。

(a) 结构图; (b) 原理图

Fig. 1 Proposed naked-eye 3D LED display based on the parallax barrier with weakened moiré fringes.

(a) Structure; (b) principle

该狭缝光栅内的透光条宽度不是一致的,而是周期性变化的,且会在周期内进行适当的移动,但周期 T 的大小保持不变。设所用透光条宽度的种类

数为 n (n 为不小于 2 的自然数), W_{wi} 是第 i 个透光条宽度, W_{bi} 是第 i 个挡光条宽度,所有透光条均向同一方向偏移 a_i ,透光条偏移之后留下的空间替换成不透光部分,与挡光条作用一致(其中 i 为小于等于 n 的自然数)。关系式如下:

$$W_{wi} + W_{bi} + a_i = T. \quad (1)$$

LED 屏的像素点间距为 p ,实际发光部分近似呈正方形,设其边长为 d ,黑矩阵半宽度为 c 。由前置狭缝光栅裸眼 3D 显示中的几何光学原理可以得到各个参数之间的关系为

$$D = \frac{p \cdot S}{e + p}, \quad (2)$$

$$T = \frac{K \cdot e \cdot p}{e + p}, \quad (3)$$

$$W_w = \frac{e \cdot p}{e + p}. \quad (4)$$

通过(2)~(4)式可以确定参数 D 、 T 和常规竖直狭缝光栅的透光条宽度 W_w 。

错位非均宽透光条狭缝光栅的结构如图 2 所示。本课题组在保持周期 T 大小不变的情况下,设计了狭缝光栅的 n 种透光条宽度 W_{wi} ,且设可变的透光条宽度的上限为 W_{wmax} ,下限为 W_{wmin} 。经验表明,当透光条宽度等于像素点间距 p 与黑矩阵宽度 $2c$ 之和时,可有效弱化莫尔条纹,且对串扰的影响较小,如果再扩大其宽度就会导致串扰急剧增加;当透光条宽度等于常规宽度 W_w 时,这是透光条所能采用的最小宽度,再缩小其宽度就会导致莫尔条纹更加严重,且立体图像亮度会发生严重损失。因此,可以得到用于限定此狭缝光栅各透光条宽度的关系式:

$$W_{wmax} = p + 2c = d + 4c, \quad (5)$$

$$W_{wmin} = W_w = \frac{e \cdot p}{e + p}, \quad (6)$$

$$W_{wmax} \geq W_{wi} \geq W_{wmin}. \quad (7)$$

然后,在每一周期 T 内适当移动其中的透光条位置。根据图 1(b)的分光原理可知, a_i 与 W_{wi} 之和需小于等于 W_{wmax} ,即

$$a_i + W_{wi} \leq W_{wmax}. \quad (8)$$

否则视点间的串扰就会加剧。重复这 n 个周期结构直到它们所构成的狭缝光栅与 LED 屏宽度相同。

这种根据 LED 屏黑矩阵较宽的特点,通过适当增大狭缝光栅的透光条宽度和移动透光条在其周期中位置的方法,可以增加狭缝光栅周期结构与 LED 屏像素周期结构之间的差异,以此降低分光元件和显示屏的相关性,进而降低莫尔条纹中暗带的对比

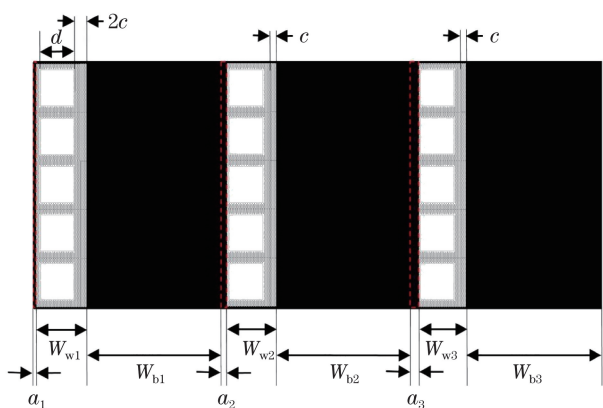


图2 错位非均宽透光条狭缝光栅的结构

Fig. 2 Structure of the malposed parallax barrier with discrepant slit widths

度,并使莫尔条纹变得稀疏,从而既能弱化莫尔条纹,又不会明显增加立体图像的串扰。

3 实验样机

为了验证所提出的狭缝光栅 LED 裸眼 3D 显示器理论的正确性,本课题组制作了实验样机。该样机所使用的 LED 屏参数如下: $p = 1.25 \text{ mm}$, $d = 1.05 \text{ mm}$, $c = 0.10 \text{ mm}$;3D 显示器的参数设计如下: $K = 4$, $S = 2.65 \text{ m}$, $e = 65 \text{ mm}$, $n = 3$ 。

由上述参数并结合(1)~(6)式可得样机所采用的错位非均宽透光条狭缝光栅的 4 个重要参数: $T = 4.9057 \text{ mm}$, $D = 50 \text{ mm}$, $W_{w\max} = 1.4500 \text{ mm}$, $W_{w\min} = W_w = 1.2264 \text{ mm}$ 。再结合(7)~(8)式可知;该光栅可以取第一个周期 T 内的透光条宽度 $W_{w1} = 1.3500 \text{ mm}$,向右偏移 $a_1 = 0.1000 \text{ mm}$,则挡光条宽度 $W_{b1} = 3.4557 \text{ mm}$;第二个周期 T 内的透光条宽度 $W_{w2} = 1.3000 \text{ mm}$,向右偏移 $a_2 = 0.1500 \text{ mm}$,则挡光条宽度 $W_{b2} = 3.4557 \text{ mm}$;第三个周期 T 内的透光条宽度 $W_{w3} = 1.2500 \text{ mm}$,向右偏移 $a_3 = 0.2000 \text{ mm}$,则挡光条宽度 $W_{b3} = 3.4557 \text{ mm}$ 。然后,按从左向右或从右向左的顺序依次重复这三个周期结构,直到由这些周期结构构成的狭缝光栅与 LED 屏宽度相同,即完成了该错位非均宽透光条狭缝光栅的制作。

在样机的装配过程中,本课题组采用印刷显示的工艺印制狭缝光栅,其印刷精度最高可达 $1 \times 10^{-6} \text{ mm}$;然后再将印制好的狭缝光栅粘合在玻璃基板上,平行放置于 LED 屏前方 50 mm 处,即完成了样机的简易装配,如图 1(a)所示。样机的主要参数如表 1 所示。

为了进行对比,本课题组也制作了与所提弱化

表 1 所提狭缝光栅 LED 裸眼 3D 显示器样机的参数和规格
Table 1 Parameters and specifications of the proposed naked-eye 3D LED display based on the parallax barrier

| Parameter | Value |
|----------------|-------------|
| Size / (m × m) | 0.70 × 0.72 |
| 2D resolution | 560 × 576 |
| 3D resolution | 140 × 576 |
| p / mm | 1.25 |
| K | 4 |
| S / m | 2.65 |
| e / mm | 65 |
| D / mm | 50 |
| T / mm | 4.9057 |
| | 1.3500 |
| W_{wi} / mm | 1.3000 |
| | 1.2500 |

莫尔条纹狭缝光栅 LED 裸眼 3D 显示器样机参数一样的常规垂直狭缝光栅 LED 裸眼 3D 显示器样机,常规样机中狭缝光栅的透光条宽度 $W_w = 1.2264 \text{ mm}$ 。图 3 所示为在最佳观看距离处拍摄的两台样机显示立体图像时的莫尔条纹细节图(虚线框内为莫尔条纹暗带)。其中:图 3(a)是提出的裸眼 3D 显示器样机的显示效果,可以看出其莫尔条纹暗带比较淡、细且稀疏,3D 观看效果良好;而图 3(b)是常规裸眼 3D 显示器样机的显示效果,可以看出其莫尔条纹暗带比较显著、宽且密集,3D 观看效果不佳。

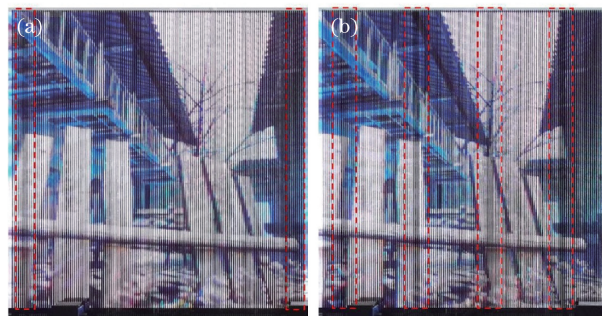


图 3 (a)所提裸眼 3D 显示器样机及 (b)常规裸眼 3D 显示器样机的显示效果

Fig. 3 Display effects of (a) the proposed naked-eye 3D display prototype and (b) the conventional naked-eye 3D display prototype

用 ASAP 软件对两台样机进行仿真,得到了在最佳观看距离处水平方向上的归一化亮度分布,如图 4 所示。其中图 4(a)是所提裸眼 3D 显示器样机的仿真结果,图 4(b)是常规裸眼 3D 显示器样机的

仿真结果。对比可以看出,在图 4(a)中各视点亮度曲线的重叠区域比图 4(b)中的略微多一点,因此串扰也就会略微增加,但对可视区域和观看效果的影响很小。

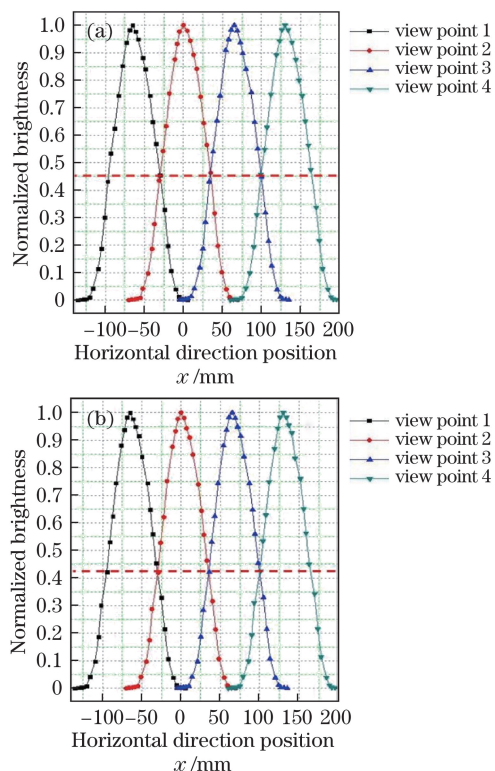


图 4 在最佳观看距离上的归一化亮度分布。

(a)所提裸眼 3D 显示器样机;(b)常规裸眼 3D 显示器样机

Fig. 4 Normalized brightness distributions at the optimum 3D viewing distance. (a) The proposed naked-eye 3D display prototype; (b) the conventional naked-eye 3D display prototype

图 3(a)与图 3(b)的实验效果以及和图 4(a)与图 4(b)的归一化亮度对比表明,所提裸眼 3D 显示器样机可以明显地弱化 3D 显示时的莫尔条纹,并且不会明显增加立体图像的串扰,提升了立体图像的显示效果。但是由于本课题组只是验证提出的新结构,所以仅采用了实验室现有的 LED 屏,其像素点间距较大,3D 分辨率不够高。如果采用性能更好、像素点间距更小的 LED 屏,则显示效果将进一步提升。

4 结 论

本课题组提出了一种弱化莫尔条纹的狭缝光栅 LED 裸眼 3D 显示器,它由 LED 屏和错位非均宽透光条的狭缝光栅构成。该狭缝光栅通过适当增大透光条宽度和移动透光条在其周期中的位置来增加狭

缝光栅的周期结构与 LED 屏像素周期结构之间的差异,降低了莫尔条纹中暗带的对比度,并使莫尔条纹明显淡化、变细且变得稀疏,既弱化了莫尔条纹,又不会明显增加立体图像的串扰。制作了所提狭缝光栅 LED 裸眼 3D 显示器和常规垂直狭缝光栅 LED 裸眼 3D 显示器样机,它们的显示效果对比表明,所提裸眼 3D 显示器的莫尔条纹显著弱化,且无明显的立体图像串扰,验证了理论的正确性。

参 考 文 献

- [1] Wang Q H. 3D display technologies and devices[M]. Beijing: Science Press, 2011: 87-105.
王琼华. 3D 显示技术与器件[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 87-105.
- [2] Fan H, Zhou Y G, Wang J H, *et al.* Full resolution, low crosstalk, and wide viewing angle auto-stereoscopic display with a hybrid spatial-temporal control using free-form surface backlight unit[J]. Journal of Display Technology, 2015, 11(7): 620-624.
- [3] Ma H Q, Wang X L, Fan H, *et al.* Design of real-time measuring system for autostereoscopic 3D displays[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(6): 061201.
马鸿钦, 王晓露, 范杭, 等. 裸眼 3D 显示串扰率实时检测系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(6): 061201.
- [4] Chen F P, Zhang X T, Wang X Y, *et al.* Design of autostereoscopic 3D display with no crosstalk and full resolution [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4): 041201.
陈芳萍, 张晓婷, 王孝艳, 等. 无串扰和无分辨率损失的自由 3D 显示器设计[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 041201.
- [5] Takatori O. Three-dimensional imaging techniques[M]. New York: Academic Press, 1976: 350-392.
- [6] Chen H Y, Liang H W, Lai W H, *et al.* A 2D/3D switchable directional-backlight autostereoscopic display using polymer dispersed liquid crystal films[J]. Journal of Display Technology, 2016, 12(12): 1738-1744.
- [7] Dodgson N A. Autostereoscopic 3D displays[J]. Computer, 2005, 38(8): 31-36.
- [8] Mphemo W, Huang Y P, Shieh H P D. Enhancing the brightness of parallax barrier based 3D flat panel mobile displays without compromising power consumption[J]. Journal of Display Technology, 2010, 6(2): 60-64.
- [9] Geng J. Three-dimensional display technologies[J]. Advances in Optics and Photonics, 2013, 5(4):

- 456-535.
- [10] Yamamoto H, Nishimura H, Abe T, *et al.* Large stereoscopic LED display by use of parallax barrier of aperture grille type (invited paper)[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(6): 060006.
- [11] Su P, An P L, Ma J S, *et al.* Demonstration of an autostereoscopic three-dimensional light-emitting diode display using diffractive optical elements sheet[J]. Journal of Display Technology, 2015, 11(11): 953-958.
- [12] Su P, An P L, Ma J S, *et al.* Characteristics of the autostereoscopic three-dimensional LED display based on diffractive optical elements sheet[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 10022: 100221Y.
- [13] An S, Su P, Ma J S, *et al.* Analysis of stereo depth for 3D LED autostereoscopic displays based on the physical limitation[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10378: 103780V.
- [14] Huang Y Z, Swash R M, Sadka A. Innovative 3D pixal mapping method for LED holoscopic 3D display[C]. The 4th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN), 2017: 330-333.
- [15] Zhao R L, Zhao W X, Wang Q H, *et al.* Research on stereo viewing zone in autostereoscopic display based on parallax barrier[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(5): 960-963.
赵仁亮, 赵悟翔, 王琼华, 等. 狭缝光栅自由立体显示器立体可视区域的研究[J]. 光子学报, 2008, 37(5): 960-963.
- [16] Yamamoto H, Kimura T, Matsumoto S, *et al.* Viewing-zone control of light-emitting diode panel for stereoscopic display and multiple viewing distances[J]. Journal of Display Technology, 2010, 6(9): 359-366.
- [17] Su X Y, Li J T. Information optics [M]. Beijing: Science Press, 1999: 196-206.
- [18] Kong L S, Jin G, Wang T C. Analysis of moiré minimization in autostereoscopic parallax displays[J]. Optics Express, 2013, 21(22): 26068.
- [19] Wang P S, Yao J M, Lin Z X, *et al.* Design of vertically staggered barrier for autostereoscopic display[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2011, 22(6): 827-830.
王培顺, 姚剑敏, 林志贤, 等. 自由立体显示器垂直交错狭缝光栅的设计[J]. 光电子 • 激光, 2011, 22(6): 827-830.
- [20] Yao J M, Xin Q, Guo T L. Design of zigzag staggered barrier for autostereoscopic display[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(10): 1176-1179.
姚剑敏, 辛琦, 郭太良. 自由立体显示器中锯齿状交错狭缝光栅的设计[J]. 光子学报, 2012, 41(10): 1176-1179.
- [21] Xu G, Hou C P, Shen L L. Theoretical analysis of tilt angles based on autostereoscopic display with slanted barrier[J]. Laser Technology, 2016, 40(3): 388-391.
许国, 侯春萍, 沈丽丽. 狭缝光栅立体显示光栅倾斜角度理论分析[J]. 激光技术, 2016, 40(3): 388-391.
- [22] Zeng X Y, Zhou X T, Guo T L, *et al.* Crosstalk reduction in large-scale autostereoscopic 3D-LED display based on black-stripe occupation ratio[J]. Optics Communications, 2017, 389: 159-164.
- [23] Kong L S, Liu C Y, Zhang Y, *et al.* Progress on removing moiré patterns in parallax autostereoscopic displays[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2014, 29(3): 441-449.
孔令胜, 刘春雨, 张元, 等. 视差自由立体显示中莫尔条纹消除的研究进展[J]. 液晶与显示, 2014, 29(3): 441-449.