

文章编号: 1000-7032(2019)07-0898-09

基于 TracePro 的狭缝光栅自由立体 LED 显示器件的串扰仿真

曾祥耀

(中国(福建)自由贸易试验区厦门片区管委会, 福建 厦门 361006)

摘要: 利用 TracePro 仿真软件对狭缝光栅自由立体 LED 显示器件的串扰进行仿真。首先,通过对狭缝光栅的设计原理分析,并基于 LED 模块的发光像素面积 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$,黑矩阵的面积 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$,设定最佳观看距离为 5 m 的两视点狭缝光栅自由立体 LED 显示器件,计算出光栅的狭缝宽度和挡光宽度都为 2.87 mm 。其次,利用这些参数,通过 TracePro 软件建立狭缝光栅自由立体 LED 显示器件的仿真模型,通过仿真运算得到左、右视频的光照度分布图,并通过归一化发现它们的光照度均匀性较差,观看时会导致“眩晕”现象。最后,借助自由立体显示器件串扰的测量方法,根据仿真左、右视频照度分布图的交叉曲线,定性分析了仿真结果,并结合 Origin 9.1 软件定量对仿真的串扰值进行计算,得出其串扰值为 42.4% 。这为进一步优化狭缝光栅自由立体 LED 显示器件的设计和性能提供了理论依据和技术支持。

关键词: 立体显示; 狭缝光栅自由立体 LED 显示; 仿真; 串扰

中图分类号: TN27 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20194007.0898

Crosstalk Simulation of LED Autostereoscopic Display Based on TracePro Software

ZENG Xiang-yao

(Administration of Xiamen Area of China(Fujian) Pilot Free Trade Zone, Xiamen 361006, China)

* Corresponding Author, E-mail: tsengjacky@126.com

Abstract: In this article, an optical software of TracePro was used to simulate the crosstalk of LED autostereoscopic display. Based on analyzing the design theory of two viewing-point LED autostereoscopic display, the LED model lighting pixel area is $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$, and the black matrix area is $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$. Assuming that the best view distance is 5 m , we calculate the silt and barrier width are both 2.87 mm . With these parameters, we can model the crosstalk of LED autostereoscopic display to compute and qualitatively analyze the illuminance of left and right view. With normalizing the illuminance, we found different uniformity distribution will cause dizzy phenomenon. Finally, according to the measurement method of crosstalk and the crosstalk of left and right simulation illuminance, we also get the crosstalk value of the LED autostereoscopic display, which is 42.4% obtained by Origin 9.1 software. This supplies the theory and technology method to improve the design and performance of LED autostereoscopic display.

Key words: stereoscopic display; LED autostereoscopic display; simulation; crosstalk

收稿日期: 2019-04-18; 修订日期: 2019-05-03

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0401503); 国家“863”计划重大专项(2012AA03A301); 福建省重点项目(2013H0033); 广东省科技重大专项(2016B090906001); 福建省科技重大专项(2014HZ0003-1); 厦门市科技计划项目(3502Z20143024)资助
Supported by National Key Research and Development Program of China(2016YFB0401503); National High-tech R&D Program of China(863 Program)(2012AA03A301); Science and Technology Key Program of Fujian Province(2013H0033); Science and Technology Major Program of Guangdong Province(2016B090906001); Science and Technology Major Program of Fujian Province(2014HZ0003-1); Science Foundation of Xiamen Science and Technology Bureau(3502Z20143024)

1 引言

随着显示技术的发展,自由立体显示技术取得了重大突破,其商业化进程不断加快^[1-13]。而广泛应用于大屏幕显示的自由立体显示 LED 显示器件的技术实现及其性能研究成为研究热点^[3,14-15]。其中,狭缝光栅自由立体显示技术较容易实现,且成本较低,特别适合应用于大屏幕 LED 自由立体显示^[16-21]。然而,狭缝光栅自由立体 LED 显示器件存在着较严重的串扰现象,这主要是因为左、右视频光源光线透过光栅后沿着不同的方向传播,在达到人眼之前的空间不能完全分离,而是会在空间中产生一定的重叠交叉,并在人眼观看时重叠而产生串扰^[22]。同时,光线通过光栅时产生的衍射也会增加串扰的严重性。从某种意义上来说,利用狭缝光栅制备自由立体 LED 显示器件,串扰和莫尔条纹现象不可避免。福州大学光电显示技术研究团队提出利用调节 LED 模块的黑矩阵宽度或改变 LED 模块显示发光像素的间距的方法减少自由立体 LED 显示串扰^[23-24]。同时,高密度 LED 显示屏存在莫尔条纹现象,而狭缝光栅自由立体 LED 显示器件则由于光栅挡光条与 LED 显示屏的黑矩阵互相影响,莫尔条纹就更为明显^[25]。因此,本文将通过 TracePro 软件仿真狭缝光栅自由立体 LED 显示器件,并对串扰进行分析。TracePro 软件是一套由美国 Lambda Research 公司开发并广泛应用于常规光学及器件分析、辐射度分析、光度分析和照明系统设计及分析的光学模拟仿真软件^[26-28]。该软件具备强大光学分析及不同仿真软件格式的相互转换功能,并可实现 3D 建模,也可兼容 ProE、Zemax、SolidWorks、CodeV 等 3D 软件绘制的模型。它采用 Monte Carlo 以及 Non-Sequential 光线追迹进行光路仿真,并进行准确、有效的分析。利用 TracePro 软件进行光学模拟仿真,可为实验的理论参数、器件模型优化和结果分析节省时间成本,并灵活调整实验方案。因此,本文采用 TracePro 软件来模拟仿真狭缝光栅自由立体 LED 显示器件,并通过分析设置的光线接收屏,获取观察面上的自由立体 LED 显示器件相关参数,从而仿真出自由立体 LED 显示器件的串扰。

2 狭缝光栅自由立体 LED 显示器件仿真模型的建立

基于狭缝光栅自由立体 LED 显示原理,结合狭缝光栅的特性,用 TracePro7.0 光学模拟仿真软件对狭缝光栅自由立体 LED 显示器件进行模拟仿真,并对模型大小、相对位置、相关特性等方面进行建模,其中包括对 LED 显示屏、狭缝光栅和图像接收屏仿真模型的建立。模型建立时,主要对 LED 显示屏的子像素间距、立体显示系统的视点间距、视点数、观看距离、光栅放置位置等参数进行确定。

2.1 狭缝光栅设计原理

狭缝光栅自由立体 LED 显示器件的实现原理及设计是将显示器件像素间的黑矩阵作为立体显示发光像素,其设计原理如图 1 所示。

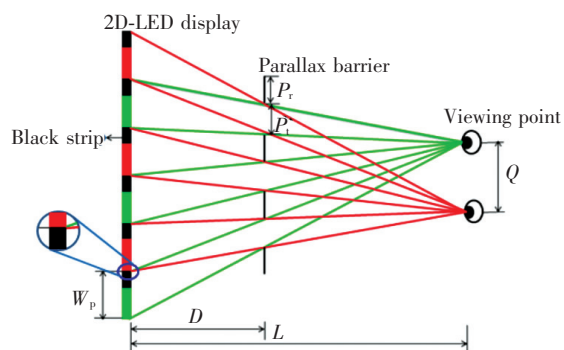


图1 狭缝光栅自由立体 LED 显示器件设计原理

Fig.1 Design diagram of autostereoscopic 3D-LED display based on parallax-barrier technology

从图 1 可以看出,自由立体 LED 显示器件主要由 LED 显示屏和狭缝光栅组成。其中, W_p 是 LED 显示屏的像素,包括发光像素和黑矩阵宽度; P_1 和 P_2 分别为狭缝光栅的狭缝宽度和挡光宽度; Q 则表示观察者两眼瞳孔的间距(一般都认为是 65 cm); D 为 LED 显示屏到光栅之间的间距; L 为观察者与显示屏的间距,该距离可以根据自由立体 LED 显示器件的大小和观看场景大小的需求设计来加以调整;同时设定 P_s 为光栅宽度的一个周期,即 P_1 和 P_2 之和; N 为所设计自由立体 LED 显示器的视点数。

根据图 1 的结构几何关系,利用相似三角形原理得到以下关系式:

$$\frac{P_1}{W_p} = \frac{L - D}{L}, \quad (1)$$

$$\frac{P_s}{NW_p} = \frac{L - D}{L}, \quad (2)$$

$$\frac{W_p}{Q} = \frac{D}{L - D}, \quad (3)$$

$$P_s = P_t + P_r, \quad (4)$$

对公式(1)~(4)进行推导,可得出以下关系式:

$$D = \frac{W_p L}{Q + W_p}, \quad (5)$$

$$P_t = \frac{Q W_p}{Q + W_p}, \quad (6)$$

$$P_s = \frac{N Q W_p}{Q + W_p}. \quad (7)$$

从以上公式可知,设计狭缝光栅自由立体 LED 显示器件,首先需确定 Q 、 N 、 L 和 W_p 等参数,再利用公式(6)和公式(7)计算出狭缝光栅参数 P_t 和 P_s 。由于光栅遮光材料只要能够完全挡光,其厚度远小于光栅基板的厚度,不影响观察者的观看光路,所以可以忽略不计。公式(5)则可以计算出光栅距 LED 显示屏的安装距离。

2.2 仿真模型的建立

模型参数的建立是基于制备大屏幕自由立体 LED 显示器件实验中所购买的 LED 显示屏特征,其中,LED 显示屏的发光像素面积为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$,黑矩阵的面积为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$,总像素为 32×16 。假定人的两眼间距 $Q = 65 \text{ mm}$,最佳观看距离 $L = 5 \text{ m}$,视点数为 $N = 2$,利用公式(5)~(7),则可分别计算 LED 显示屏到光栅之间的间距 D 、狭缝光栅的狭缝宽度 P_t 和一个周期宽度 P_s ,其值分别为 220.59 、 2.87 、 5.74 mm 。通过公式(4)计算狭缝光栅的挡光宽度 P_r 为 2.87 mm 。基于这些参数,通过 TracePro7.0 光学模拟仿真软件,即可建立起自由立体 LED 显示器件模型,如图 2 所示。

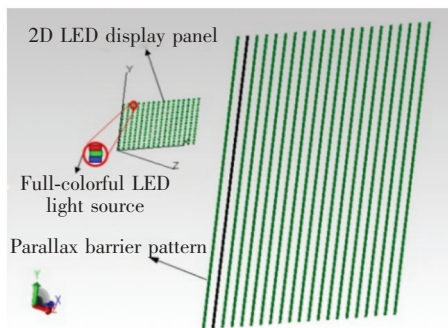


图 2 狭缝光栅自由立体 LED 显示器件仿真模型

Fig. 2 Simulation model for autostereoscopic 3-D LED display system in TracePro

仿真时,LED 光源的结构参数设置为 2 mm ,光源的间距为 1 mm ,效果图如图 3(a)所示。光源属性设置为发射光度类型,发射光线符合朗伯分布。单个 LED 光源的功率设置为 1 W ,总光线数为 $20\,000$ 条,波长为 520 nm ,如图 3(b)所示。

光栅设置于距 LED 显示屏的距离 $D = 220.59 \text{ mm}$ 处,其挡光宽度 P_r 和狭缝宽度 P_t 都为 2.87 mm ,光栅长度为 300 mm ,厚度为 0.01 mm ,总光

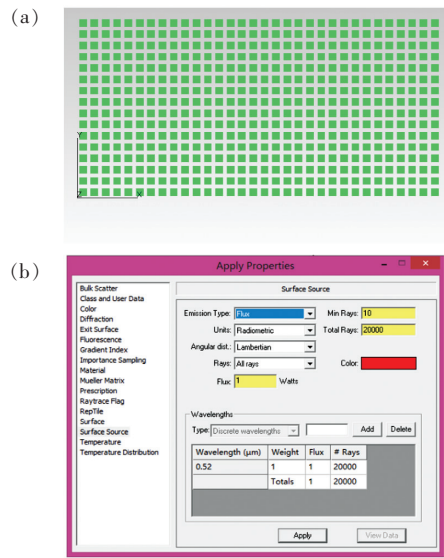


图 3 LED 光源仿真。(a) 结构图;(b) 属性设置。

Fig. 3 Simulation model for LED light source in TracePro.

(a) Structure pattern. (b) Properties setting.

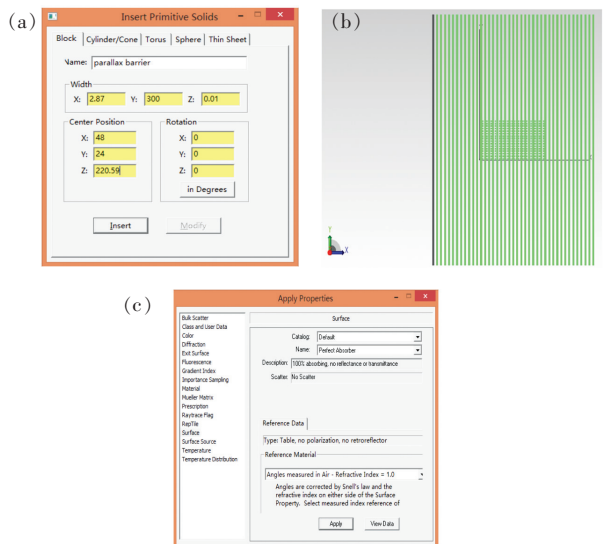


图 4 光栅仿真。(a) 参数设置;(b) 结构图;(c) 属性设置。

Fig. 4 Simulation model for parallax barrier in TracePro.

(a) Parameters setting. (b) Structure pattern. (c) Properties setting.

栅数为 41 条,其参数的设置、结构图和属性设置结果分别如图 4(a)、(b)、(c)所示。为了检验和分析大屏幕自由立体 LED 显示器件的观看效果,仿真时假定一个观察接收屏来表示观看者的视觉效果,它距 LED 显示屏的距离 L 为最佳观看距离 5 m,大小则为 700 mm \times 700 mm \times 1 mm。参数的设置、结构图和属性设置分别如图 5(a)、(b)、(c)所示。

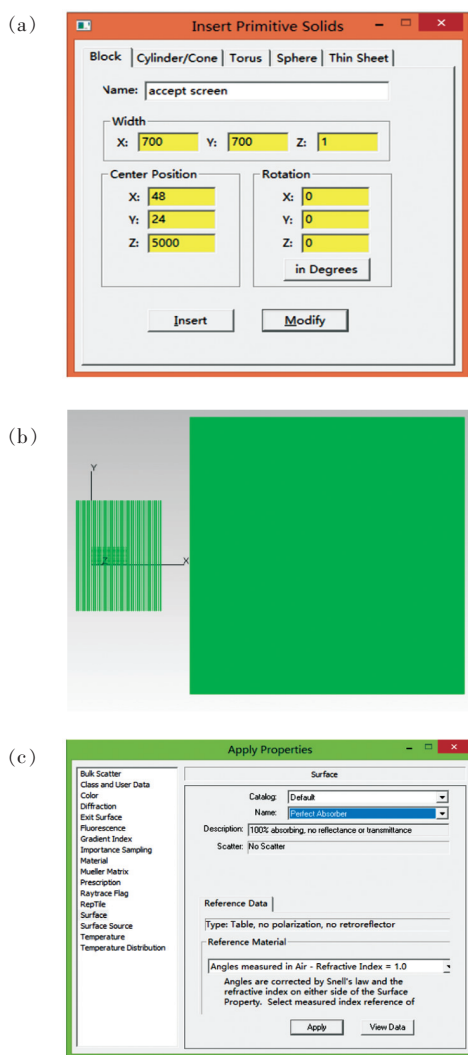


图 5 接收屏仿真。(a)参数设置;(b)结构图;(c)属性设置。

Fig. 5 Simulation model for accepting screen in TracePro.

(a) Parameters setting. (b) Structure pattern. (c) Properties setting.

以上通过对狭缝光栅自由立体 LED 显示设计原理的公式推导及在 TracePro7.0 光学模拟仿真软件中对光源、狭缝光栅、接收屏的结构和属性设置,完成了大屏幕自由立体 LED 显示器件的仿

真模型。

3 显示器件 TracePro 仿真结果及分析

由于大屏幕狭缝光栅自由立体 LED 显示器件的仿真运算量较大,对计算机的硬件要求较高,本文采用了由 12 枚 Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2609 v3 @ 1.90 GHz,32.0 G 内存组成的小型服务器进行仿真运算。

狭缝光栅自由立体 LED 显示器件的显示是基于双目视差原理,因此在模拟显示效果时可分为两个步骤来完成。在模拟左眼观看效果时,设置左眼视频的光源发光,右眼视频的光源不发光;在模拟右眼观看效果时,设置右眼视频的光源发光,左眼视频的光源不发光。经过仿真运算,就可在接收屏上分别得到左眼和右眼观看效果的光照度分布。在分析仿真结果时,把接收屏中所接收的光线分布作为观看者双眼所看到的大屏幕自由立体 LED 显示器件显示结果。因此,接收屏的光照强度分布图是分析的重点。模型建立时,接

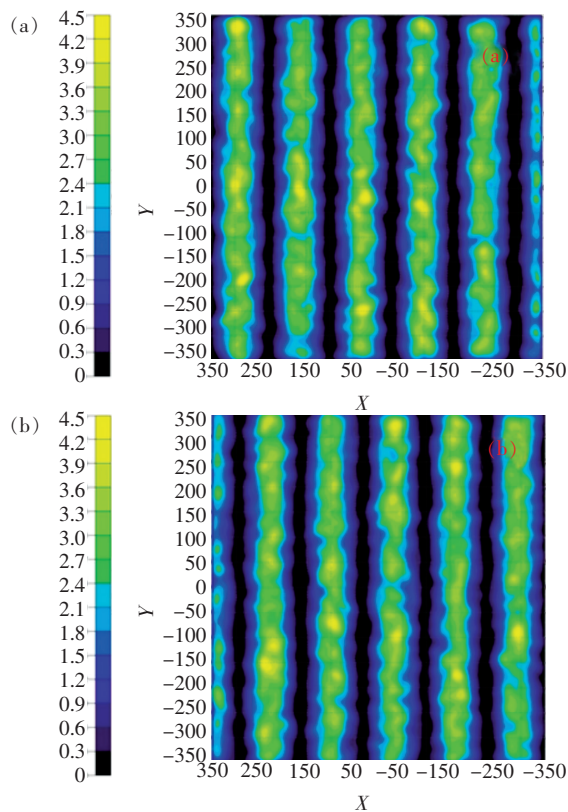


图 6 视频光源在接收屏上的光照度分布图。(a)左眼视频;(b)右眼视频。

Fig. 6 Simulation results for flux density distribution. (a) Left-eye view. (b) Right-eye view.

收屏的大小设置为 $700\text{ mm} \times 700\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 。经过仿真运算,左、右眼视频光源在接收屏上的光照度分布情况分别如图 6(a)、(b)所示。图 6 中的左边不同颜色刻度在光照度分布图中表示不同的光照度, x 横坐标和 y 纵坐标分别为从 $-350 \sim 350\text{ mm}$,与接收屏的设置大小一致。同时,由于设置 LED 光源发出的光线透过光栅,左、右眼观看视频光源在接收屏上形成光照度不均的亮、暗相间条纹,与大屏幕狭缝光栅自由立体 LED 显示器件相吻合。当左、右眼观看视频光源的接收屏合并起来则可以形成左、右眼同时观看到的效果,表达出左、右眼同时观看的串扰。

图 7(a)、(b)为光照度在不同位置的归一化分布情况,从中可以更直观地看出左、右视频光源透过光栅后的光照度在接收屏上的分布情况。

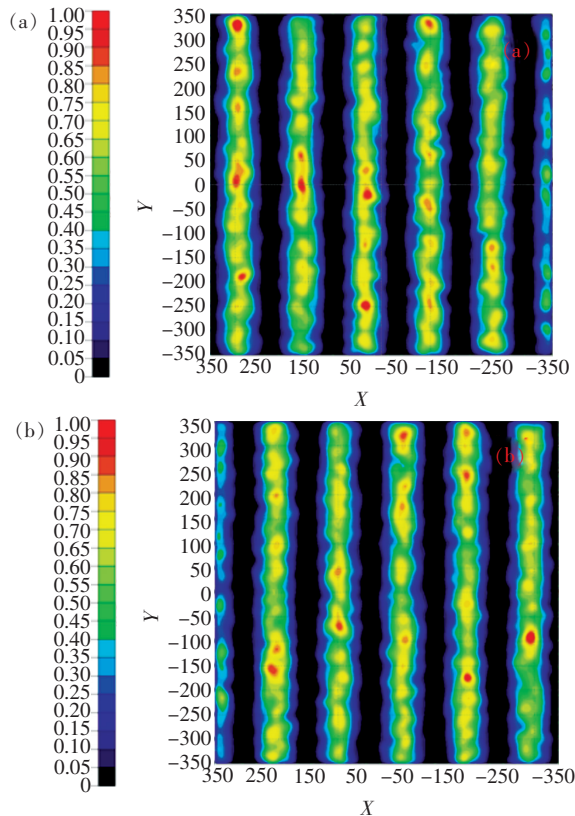


图 7 视频光源在接收屏上的光照度归一化分布图。(a) 左眼视频;(b)右眼视频。

Fig. 7 Normalized simulation results for flux density distribution. (a) Left-eye view. (b) Right-eye view.

从图 7(a)、(b)中可以看出,归一化光照度分布图与未归一化光照度分布图 6(a)、(b)大体一致,但 LED 显示屏光源工作时发射的光透过光栅后,其左、右眼的强度并非对称,均匀性较差,会

导致在观看高亮度的 LED 显示屏时不舒适感增强,产生“眩晕”。

为了更加直观地反映光照度分布在不同观看位置的变化情况和串扰情况,将图 6(a)、(b)模拟的结果数据进行整合,得出图 8。从图 8 中可以看出,本文中的自由立体 LED 显示器件是两视点,黑色曲线代表左视点观看结果,即左眼视频光源的光照度在不同位置的分布情况;红色虚线代表右视点观看结果,即右眼视频光源的光照度在不同位置的分布情况。其中,横坐标 x 轴上的值代表接收屏的大小,纵坐标 y 轴上的值代表相应的光照度值大小。两种曲线都呈波浪型,其中左眼视频光源光照度的波峰正好对应于右眼视频光源光照度的波谷位置。两类波形的相邻波峰或波谷距离正好为 65 mm ,与人眼的双眼间距一致,且两种波形的交叉区域面积占一个周期的波形图的比例较大,其峰值分别小于图 6(a)、(b)中的最大值,这是由于曲线上每个横坐标 x 轴上点对应的 y 值是图 6(a)、(b)中每个横坐标 x 轴上点对应的 y 值的平均值。本文接收屏的评价网格设置为 128×128 ,图 8 左、右视点曲线就是分别由 128 个对应的数值对 (x, y) 所组成的曲线,每个 x 值由接收屏的范围从 $-350 \sim 350\text{ mm}$ 按 128 个均匀间距值组成,每个 y 值则由对应的 128 个 y 值的均值组成。因此,导致图 8 中的 y 值小于图 6(a)、(b)中的 y 值。

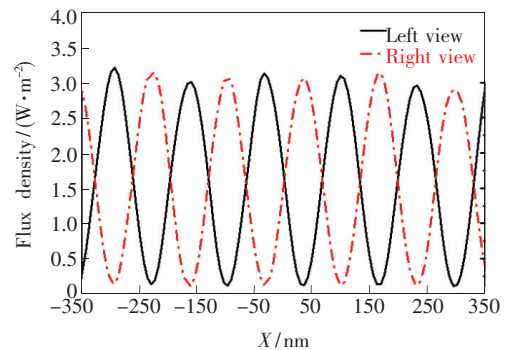


图 8 视频光源在接收屏上的光照度分布图

Fig. 8 Simulation results for flux density distribution curve analysis of average crosstalk level

4 串扰仿真定量评价

串扰严重程度是评价自由立体 LED 显示器件显示效果的一个重要参数指标。对狭缝光栅自由立体 LED 显示器件的仿真,可通过上文分析,

定性分析其串扰现象,还可从理论上计算出其串扰值,以便调整设计的光栅参数,优化器件的显示性能。

4.1 串扰定义

在图6和图7中所形成的左、右眼视频光源在接收屏上的绝对值和归一化光照度分布图,都可观看到左、右眼视频光源的光照度分布图在合并时会产生重叠区域,即左、右眼视频光源在仿真时会产生串扰。本文通过借助自由立体显示器件串扰的测量方法,对仿真产生的串扰值进行定量分析。两视点自由立体LED显示器件,测试自由立体LED显示器件的串扰分别通过测试左、右视点的视频源亮度值来计算,其左、右视点的串扰 W_L 、 W_R 可分别由公式(8)和(9)表示^[29-32]:

$$W_L = \frac{L_{LKW} - L_{LKK}}{L_{LWK} - L_{LKK}}, \quad (8)$$

$$W_R = \frac{L_{RWK} - L_{RKK}}{L_{RWK} - L_{RKK}}, \quad (9)$$

公式(8)中, L_{LKW} 是左视点的亮度值,即亮度测试仪聚焦于左视点光源,且左视点视频光源是关闭状态,右视点视频光源是开着的状态,测试显示器的亮度。 L_{LKK} 代表了左、右视点视频光源都为关闭状态测试显示器的亮度。 L_{LWK} 则在左视点视频光源是开着的状态,右视点视频光源是关闭的状态,测试显示器的亮度。

公式(9)中, L_{RWK} 是右视点的亮度值,即亮度测试仪聚焦于右视点光源,且左视点视频光源是开着的状态,右视点视频光源是关着的状态,测试显示器的亮度。 L_{RKK} 代表了左、右视点视频光源都为关闭状态测试显示器的亮度。 L_{RWK} 则在左视点视频光源是关着的状态,右视点视频光源是开着的状态,测试显示器的亮度。

根据公式(8)和(9),由于 L_{LKK} 和 L_{RKK} 的仿真实际值都为0, W_L 的值为 L_{LKW} 与 L_{LWK} 值之比; W_R 的值为 L_{RWK} 与 L_{RWK} 值之比。结合仿真结果图8,可知每个视点的串扰仿真结果就是图中的曲线重叠部分积分面积与各视点的光度积分面积之比。

4.2 串扰计算

由串扰的定义可知,要计算左、右眼的串扰值大小,就是计算曲线重叠部分的面积分别与左、右视点视频曲线积分面积的比值。通过对接收屏的数据处理,可利用 Origin 9.1 软件画出图8的曲

线,并找出左、右视点视频结果曲线的交叉点坐标。通过交叉点利用软件的曲线积分功能分段计算重叠部分的面积。同理,也可以通过软件分别画出左右视频结果曲线,再分别计算出它们的积分面积,最后根据串扰定义计算串扰值。

首先,计算左右视点视频曲线构成的面积。在模拟仿真中,左右视点视频曲线构成的积分面积即为左右眼所看到的光度值。我们可以通过处理接收屏的数据结果,利用 Origin 9.1 软件的曲线积分功能分别计算出左右视点视频曲线构成的积分面积,分别为 1 125.546 74 和 1 120.668,如图9(a)、(b)所示。

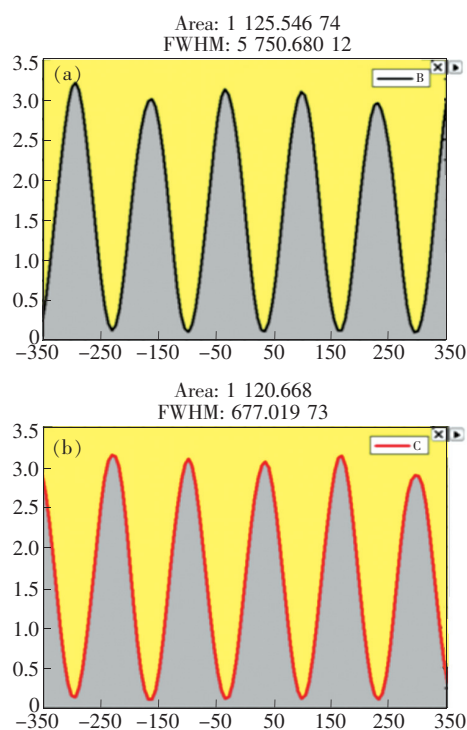


图9 光照度曲线构成的积分面积图。(a)左眼视频;(b)右眼视频。

Fig.9 Integral areas for flux density distribution curve. (a) Left-eye view. (b) Right-eye view.

其次,确定曲线交叉点的横坐标 x 值及计算曲线交叉面积。利用 Origin 9.1 软件,分别在左、右视频结果曲线查找出曲线交叉点的横坐标 x 值,并从图9判断出它们各自的积分区域,利用软件的积分功能计算重叠部分的积分面积。其计算过程分别如图10(a)、(b)所示,积分区域的横坐标 x 值和积分面积分别列于表1和表2中。

最后,通过以上对串扰结果的计算分析,可计算出左、右视频曲线积分面积,并确认曲线交叉点

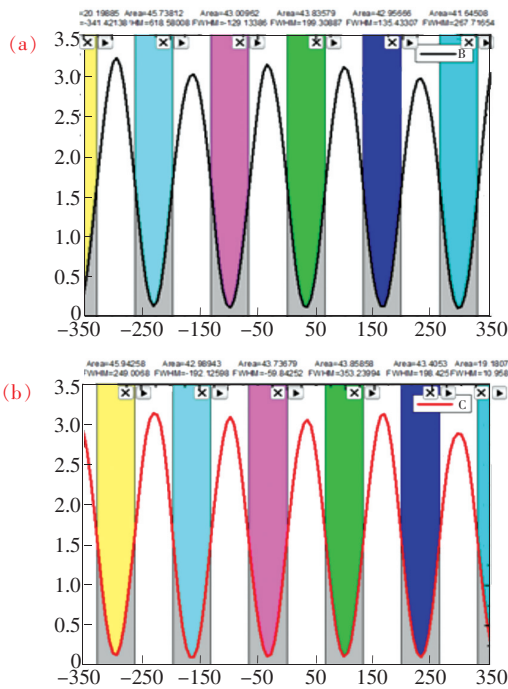


图 10 光照度曲线交叉面积积分。(a)左眼视频;(b)右眼视频。

Fig. 10 Integral cross areas of flux density distribution curve. (a) Left-eye view. (b) Right-eye view.

表 1 左眼视频光照度曲线交叉点 x 值和积分结果

Tab. 1 x values of cross point of the left-eye view flux density distribution curve and integral area results

序号	起始积分 x 坐标	结束积分 x 坐标	积分面积
1	-350	-327.4	20.198 85
2	-261.7	-196.8	45.748 12
3	-130.8	-65.8	43.009 62
4	0.25	65.7	43.835 79
5	131.1	196.3	42.956 66
6	262.2	327.8	41.645 08
总面积			237.384 12

表 2 右眼视频光照度曲线交叉点 x 值和积分结果

Tab. 2 x values of cross point of the right-eye view flux density distribution curve and integral area results

序号	起始积分 x 坐标	结束积分 x 坐标	积分面积
1	-327.4	-261.7	45.942 58
2	-196.8	-130.8	42.989 43
3	-65.8	0.25	43.736 79
4	65.7	131.1	43.858 58
5	196.3	262.2	43.405 3
6	327.8	350	19.180 78
总面积			239.113 46

的横坐标 x 值,计算出左右视频曲线交叉面积。根据串扰的定义,计算出阴影部分积分面积分别与左右视频曲线和 x 轴构成积分面积的比值,即为串扰值。根据公式(8)和(9),左、右眼串扰率分别为 42.3%和 42.5%,因此,狭缝光栅自由立体 LED 显示器件左、右串扰率的平均值即串扰值,为 42.4%。

5 结 论

本文通过狭缝光栅自由立体 LED 显示器件的设计原理,利用 TracePro 仿真软件对基于 LED 模块的发光像素面积为 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 、黑矩阵的面积为 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 、且设定最佳观看距离为 5 m 的两视点狭缝光栅自由立体 LED 显示器件的串扰进行模拟仿真。通过光栅设计原理的公式推导,计算出上述狭缝光栅自由立体 LED 显示器件的光栅狭缝宽度和挡光宽度都为 2.87 mm,并对设计出的狭缝光栅自由立体 LED 显示器件进行仿真运算,定性分析仿真结果。通过自由立体显示器件串扰的测量方法,根据仿真左、右视频照度分布图的交叉曲线,并结合 Origin 9.1 软件定量计算出其仿真串扰值为 42.4%。

参 考 文 献:

[1] TSAI C H, CHEN W L, HSU W L. 32. 4: Invited paper: the pursuit of high-definition 3D display technology [J]. *SID Symp. Digest Tech. Pap.*, 2008, 39(1):456-459.

[2] JAVIDI B, OKANO F, SON J Y. *Three-dimensional Imaging, Visualization, and Display* [M]. New York: Springer, 2009: 3-100.

[3] MPHEPÖ 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]. *J. Disp Technol.*, 2010, 6(2):60-64.

[4] 李继军, 聂晓梦, 李根生, 等. 平板显示技术比较及研究进展 [J]. *中国光学*, 2018, 11(5):695-710.

- LI J J, NIE X M, LI G S, *et al.*. Comparison and research progress of flat panel display technology [J]. *Chin. Opt.*, 2018, 11(5):695-710. (in Chinese)
- [5] SAVELJEV V, PALCHIKOVA I. Analysis of autostereoscopic three-dimensional images using multiview wavelets [J]. *Appl. Opt.*, 2016, 55(23):6275-6284.
- [6] 王爱红, 王琼华, 李大海, 等. 立体显示中立体深度与视差图获取的关系 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(2):433-438.
- WANG A H, WANG Q H, LI D H, *et al.*. Relationship between stereo depth and parallax image captured in stereoscopic display [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2):433-438. (in Chinese)
- [7] 张雷, 杨勇, 赵星, 等. 基于小发散角的投影式集成成像三维显示再现深度的拓展 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6):1159-1165.
- ZHANG L, YANG Y, ZHAO X, *et al.*. Enhancement of field depth for projection-type integral imaging three-dimensional display based on small diverging angle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6):1159-1165. (in Chinese)
- [8] GAO Q K, LIU J, HAN J, *et al.*. Monocular 3D see-through head-mounted display *via* complex amplitude modulation [J]. *Opt. Express*, 2016, 24(15):17372-17383.
- [9] 谢宏斌, 杨勇, 赵星, 等. 狭缝光栅、柱面透镜光栅及其新构型在三维显示中的应用 [J]. *中国光学*, 2011, 4(6):562-570.
- XIE H B, YANG Y, ZHAO X, *et al.*. Applications of parallax barrier, lenticular lens array and their modified structures to three-dimensional display [J]. *Chin. Opt.*, 2011, 4(6):562-570. (in Chinese)
- [10] CHEN J S, CHU D P. Realization of real-time interactive 3D image holographic display [Invited] [J]. *Appl. Opt.*, 2016, 55(3):A127-A134.
- [11] 杨兰, 曾祥耀, 邹卫东, 等. 基于插值算法的立体显示的图像合成与嵌入式实现 [J]. *发光学报*, 2016, 37(10):1237-1244.
- YANG L, ZENG X Y, ZUO W D, *et al.*. Image synthesis and realization of embedded 3D display system based on interpretation algorithm [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2016, 37(10):1237-1244. (in Chinese)
- [12] 曾祥耀, 赵焱, 郭太良, 等. 立体显示在虚拟/增强现实技术中的应用与发展 [J]. *电视技术*, 2017, 41(9-10):135-140.
- ZENG X Y, ZHAO Y, GUO T L, *et al.*. Application and development of stereoscopic display in virtual/augmented reality technology [J]. *Video Eng.*, 2017, 41(9-10):135-140. (in Chinese)
- [13] 薛钊鸿, 孙梓瀚, 成泽锐, 等. 基于人眼检测优化的立体人机交互技术的研究 [J]. *液晶与显示*, 2018, 33(11):958-964.
- XUE Z H, SUN Z H, CHENG Z R, *et al.*. 3 D human-machine interaction based on human eye detection [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2018, 33(11):958-964. (in Chinese)
- [14] PARK S G, YAMAGUCHI Y, NAKAMURA J, *et al.*. Long-range 3D display using a collimated multi-layer display [J]. *Opt. Express*, 2016, 24(20):23052-23062.
- [15] YAMAMOTO H, KIMURA T, MATSUMOTO S, *et al.*. Viewing-zone control of large full-color LED display for 3-D and digital signage [C]. *Proceedings of 2009 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Houston, TX, USA*, 2009:1-7.
- [16] NISHIMURA H, ABE T, YAMAMOTO H, *et al.*. Development of 140-inch autostereoscopic display by use of full-color LED panel [C]. *Proceedings of SPIE Light-emitting Diodes: Research, Manufacturing, and Applications XI, San Jose, California, United States*, 2007:64861B.
- [17] 顾升学, 王琼华. 优势眼在光栅 3D 显示中的影响 [J]. *液晶与显示*, 2018, 33(7):590-595.
- GU S X, WANG Q H. Influence of dominant eye in three-dimension lenticular display [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2018, 33(7):590-595. (in Chinese)
- [18] WANG Q H, TAO Y H, ZHAO W X, *et al.*. A full resolution autostereoscopic 3D display based on polarizer parallax barrier [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, 8(1):22-23.
- [19] LV G J, WANG Q H, ZHAO W X, *et al.*. 3D display based on parallax barrier with multiview zones [J]. *Appl. Opt.*, 2014, 53(7):1339-1342.

- [20] LV G J, ZHAO W X, WANG J, *et al.*. Shared pixel based parallax barrier 3D display with high brightness [J]. *Optik*, 2014, 125(8):1984-1986.
- [21] YAMAMOTO H, NISHIMURA H, ABE T, *et al.*. Large stereoscopic LED display by use of parallax barrier of aperture grille type (Invited Paper) [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, 12(6):060006-1-5.
- [22] YAMAMOTO H, HAYASAKI Y, NISHIDA N. Large stereoscopic LED display by use of a parallax barrier [M]. JAVIDI B, OKANO F, SON J Y. *Three-dimensional Imaging, Visualization, and Display*, New York, NY: Springer, 2009:183-206.
- [23] 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]. *Opt. Commun.*, 2017, 389:159-164.
- [24] ZENG X Y, YANG L, ZHOU X T, *et al.*. Pixel arrangement optimization of two-dimensional light-emitting diode panel for low-crosstalk autostereoscopic light-emitting diode displays [J]. *Opt. Eng.*, 2017, 56(6):063104.
- [25] CHEN E G, CAI J, ZENG X Y, *et al.*. Ultra-large moiré-less autostereoscopic three-dimensional light-emitting-diode displays [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(7):10355-10369.
- [26] Lambda Research Corporation. TracePro software[safuare] [EB/OL]. [2013-09-10]. <http://www.lambdare.com>.
- [27] 张帅, 文尚胜, 马丙戌, 等. 适用于植物照明的高均匀度 LED 面光源设计 [J]. *发光学报*, 2018, 39(3):403-413. ZHANG S, WEN S S, MA B X, *et al.*. High uniformity LED panel-light for plant lighting [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2018, 39(3):403-413. (in Chinese)
- [28] Lambda Research Corporation. *TracePro User's Manual 7.0* [M]. Littleton: Lambda Research Corporation, 2010.
- [29] 李晶, 李建军. 光栅式自由立体显示器空间视区建模与串扰计算 [J]. *液晶与显示*, 2017, 32(5):394-401. LI J, LI J J. Modeling and crosstalk calculation methods of spatial viewing zones for the autostereoscopic display device based on parallax barrier or lenticular lens [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2017, 32(5):394-401. (in Chinese)
- [30] 夏振平, 程成. 基于视觉显著性的立体显示灰阶串扰量化 [J]. *液晶与显示*, 2017, 32(1):62-68. XIA Z P, CHENG C. Visual saliency based gray-to-gray crosstalk evaluation in stereoscopic displays [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2017, 32(1):62-68. (in Chinese)
- [31] Information Display Measurements Standard. (Version 1.03), [standard]. Society for information display [EB/OL]. [2013-05-15]. <http://www.icdm-sid.org/>.
- [32] KIM S K, YOON S K, YOON K H. Crosstalk minimization in autostereoscopic multiveiw 3D display by eye tracking and fusion (overlapping) of viewing zones [C]. *Proceedings of Three-dimensional Imaging, Visualization, and Display 2012, Baltimore, Maryland, United States*, 2012:838410.



曾祥耀(1981 -),男,福建漳州人,博士,工程师,2018年于福州大学获得博士学位,主要从事光电材料、信息显示和立体显示技术的研究。

E-mail: tsengjacky@126.com