

无串扰和无分辨率损失的自由 3D 显示器设计

陈芳萍, 张晓婷, 王孝艳, 刘楚嘉, 漆宇, 庄其仁

华侨大学信息科学与工程学院福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021

摘要 柱镜光栅式自由 3D 显示器的串扰问题和分辨率下降问题是影响其广泛应用的主要因素。采用定向背光方案,通过设计一种蝶形单元液晶显示屏光开关面板实现自由 3D 显示器的无串扰和无分辨率损失。详细推导了定向背光柱镜光栅面板的参数计算公式,给出了 55 in(1 in=2.54 cm)4K 3D 电视屏的定向背光模块结构参数,并采用 TracePro 软件仿真优化了设计参数。仿真结果表明,设计的自由 3D 显示器最低串扰小于 0.01%,近似无串扰,并且与现有眼镜快门开关式 3D 视频图像完全兼容,图像无分辨率损失。

关键词 测量; 自由 3D 显示; 串扰; 分辨率; 柱镜光栅; 定向背光

中图分类号 TN312.8 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.041201

Design of Autostereoscopic 3D Display with no Crosstalk and Full Resolution

Chen Fangping, Zhang Xiaoting, Wang Xiaoyan, Liu Chujia, Qi Yu, Zhuang Qiren

Fujian Provincial Key Laboratory of Light Propagation and Transformation, Collage of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China

Abstract The applicability of lenticular-lens-based autostereoscopic 3D display is limited due to its crosstalk and degradation of resolution. Autostereoscopic display with no crosstalk and full resolution is realized by designing a butterfly-shaped liquid crystal display shutter in a multi-directional backlight unit. And the calculation formulas of parameters of the directional backlight lenticular panel are derived theoretically. Furthermore, the multi-directional backlight unit parameters of a 55 in (1 in=2.54 cm) 4K model autostereoscopic 3D displayer are presented, and they are optimized by TracePro software. The simulation results show that the crosstalk of designed autostereoscopic display is less than 0.01% which can be approximate to zero, and it can be fully compatible with the existing glasses shutter switch 3D video images with no loss of resolution.

Key words measurement; autostereoscopic 3D display; crosstalk; resolution; lenticular grating; directional backlight

OCIS codes 120.2040; 230.3990; 110.6880; 350.2770

1 引言

基于双目视差的光栅式自由 3D 显示器是一种重要的 3D 显示器,根据光栅材料的不同,自由 3D 显示器可分为狭缝光栅和柱透镜光栅两种。基于狭缝光栅的自由 3D 显示器存在亮度低、观看角度受限等不足之处;基于柱透镜光栅的自由 3D 显示器由平板显示器和柱透镜^[1]组成,两者精密耦合在一起,柱透镜光栅可将处于位置错开的左右视差图像光分开,观看者的左右眼在最佳位置上分别观看到左右眼视差图像,经大脑

收稿日期: 2016-11-24; **收到修改稿日期:** 2016-12-02

基金项目: 福建省科技计划(高校产学研合作)重大项目(2016H2016)、华侨大学研究生科研创新能力培育项目(1511301001)

作者简介: 陈芳萍(1991—),女,硕士研究生,主要从事自由立体显示方面的研究。E-mail: 861040852@qq.com

导师简介: 庄其仁(1960—),男,博士,研究员,主要从事照明与显示技术和光电检测技术方面的研究。

E-mail: qrzhuang@hqu.edu.cn(通信联系人)

融合后产生 3D 感。基于柱透镜光栅的自由 3D 显示器具有亮度高、观看舒适度优于狭缝光栅显示器等优点^[2]。但柱透镜光栅在对合成图像进行分光时,某个视点除了接收到对应视差图像子像素所发出的光线外,还会接收到相邻视差图像子像素所发出的光线,这就产生了视点之间图像的串扰^[3],而且由于图像像素被分为若干个视点的子像素,分辨率损失很大,影响了 3D 显示器的图像质量,降低了观看者的观看舒适度^[4-5]。针对串扰问题,人们已提出了多种方法,如:纠正合成图像子像素亮度值从而使得相邻视点之间的图像串扰消除^[6-7]、分析图像子像素位置和透镜阵列的关系来减少串扰^[8]、用偏振透镜阵列来消除串扰^[9],上述方法都能在一定程度上改善视点之间图像的串扰问题,但还不能解决分辨率损失问题。

定向背光自由 3D 解决方案^[10]可以保持液晶面板的原有分辨率不变^[11],传统方法在特定视点位置可以实现很低的串扰,但在全视角很难保持低串扰^[12],因此定向背光 3D 显示技术在宽视角低串扰等方面还需要进一步优化。Fan 等^[13]提出自由曲面背光源结合时空控制来实现分辨率不损失的方法,得到了串扰低于 2.3% 的智能背光自由 3D 定向结构。本文提出另一种简单液晶开关结构的定向背光 3D 解决方案,与现有眼镜快门开关式 3D 视频图像完全兼容,不但解决了视频源问题,同时图像无串扰,无分辨率损失。

2 无串扰柱镜光栅定向背光 3D 显示原理

采用液晶显示屏(LCD)光开关面板和柱状透镜阵列的定向背光 3D 模块原理图如图 1 所示,根据柱透镜阵列的光学性质,LCD 光开关面板中的列对应着特定的光投射方向。图 1 中显示了一个 6 个方向的背光设计,LCD 光开关面板上对应每个小柱透镜有两个列 L 和 R,它们都在设定的方向上产生一个准直光束。在眼睛视点位置,所有 L 列(或 R 列)产生的光束完全重叠,而 L 列和 R 列的光束之间完全不重叠。为了使视点位置的光强分布均匀,光束应接近平顶光束,所以将 LCD 光开关面板中的列单元设计成纵向上中间窄两边宽的蝶形结构,如图 1 所示。图 1 中 L 列对应 b1、b3 和 b5 光束,R 列对应 b2、b4 和 b6 光束。轮流打开 LCD 光开关面板的 L 列和 R 列,就能产生轮流变化方向的背光输出,将另一个带有图像信息的 LCD 面板放置在背光输出的光路上,图像完整像素(RGB)单元宽度与柱状透镜单元宽度相同,并使视点图像的切换同步于背光方向的变化(与眼镜快门开关式 3D 视频图像切换原理相同),在设定的观看方向上产生 3D 显示效果。如图 1 所示,在观看方向 1、2 和 3 都可以看到视差 3D 图像,而方向 4 和 5 是盲区,在这两个方向看不到图像或者只能看到 2D 图像,设置盲区的目的是避免左右视差图像倒置产生的眩晕。盲区是通过将 L 列和

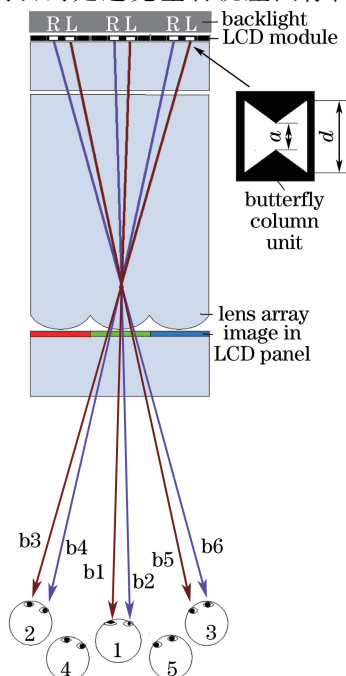


图 1 LCD 面板和柱状透镜阵列的定向背光原理图

Fig. 1 Schematic of LCD panel and lenticular array directional backlight

R 列成对排列,然后将每一对 LR 列之间分开几个列宽度的距离来实现的(将不需要的 LCD 列关闭)。同时,L 列和 R 列之间也有一定距离,这种设计的主要优势在于可使左右视差图像的串扰降低到接近为 0,图像的显示分辨率与 2D 显示分辨率相同,没有损失。而且这种 3D 显示器模块的厚度小,结构简单轻便,方便进行 3D 和 2D 图像的切换,显示 2D 图像时只要将 LCD 光开关面板中的列全部打开即可。

3 无串扰定向背光设计方法

定向背光 3D 显示中的串扰现象是指在观看 3D 显示时,由于光束指向特性不理想,每只眼睛总是能够接收到不是当前所要观看的对应视差图像所投射出的光线。

图 2 为宽度为 W 的 LCD 屏幕相邻两幅图像的像素列光束投射到距离为 l' 的视点位置 R^* 和 L^* 的光路示意图,其中 R^* 和 L^* 处的菱形区域为理想无串扰区域,两菱形区域的中心距离为人眼瞳距 S (约为 65 mm),设柱镜阵列定向背光准直光束的发散角为 α ,则每个像素列投射到 R^* 和 L^* 处菱形区域的光束宽度为

$$D \approx \alpha l' \quad (1)$$

当 $D > S$,或者一些准直光束中心偏离菱形区域中心,则相邻两幅图像的像素列光束就会在 R^* 和 L^* 处的菱形区域出现交叠,从而对菱形视点区域内的视点图像造成不可避免的干扰,也就是不同视点图像之间的串扰。因此,要实现视点位置 R^* 和 L^* 处观看图像的无串扰,首先要保证光束宽度 $D \leq S$,同时准确控制光束中心线(光轴线)经过 R^* 或 L^* 处菱形区域中心点。在图 1 所示的定向背光 3D 显示系统中,准直光束的光源为 LCD 光开关面板的一个列,具有一定宽度 d ;柱透镜阵列若采用常规柱透镜,其横截面为圆弧,图 3 为 LCD 光开关面板的一个列经过偏心的单折射柱面成像示意图,由图可见 LCD 光开关面板中的列与柱透镜组成偏轴光学系统^[14-15]。

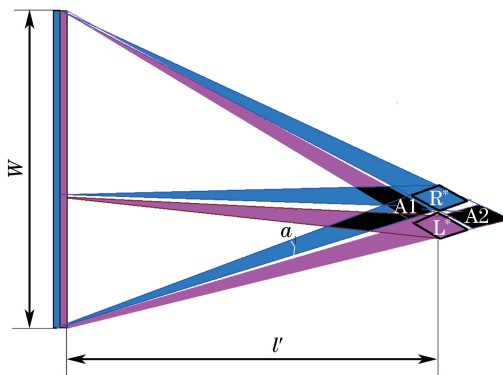


图 2 LCD 屏幕相邻两幅图像的像素列光束投射光路示意图

Fig. 2 Light path diagram of pixel column beams of two adjacent images projecting on LCD screen

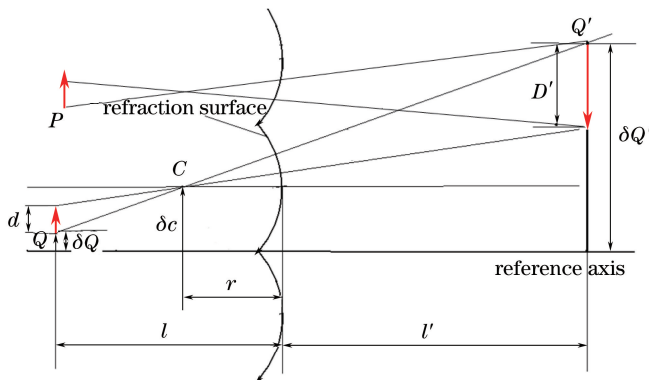


图 3 偏心的单折射柱面成像示意图

Fig. 3 Imaging diagram of bias single refractive cylindrical surface

图 3 中 δ_c 为曲率中心偏移量; Q 为某一列的边沿, Q' 为对应像面光束边沿, 两者为一对共轭点; δ_Q 、 $\delta_{Q'}$ 分别代表物像边沿相对于参考轴的偏移量; r 为柱透镜的曲率半径; l 、 l' 分别为像素点和视点位置中心点到柱透镜阵列表面的垂直距离。根据相似三角形性质可得

$$\frac{\delta_{Q'} - \delta_c}{l' + r} = \frac{\delta_c - \delta_Q}{l - r}, \quad (2)$$

即

$$\delta_{Q'} = \delta_c + \frac{l' + r}{l - r} (\delta_c - \delta_Q). \quad (3)$$

令

$$\frac{l' + r}{l - r} = m, \quad (4)$$

则(3)式可写为

$$\delta_{Q'} = (1 + m)\delta_c - m\delta_Q. \quad (5)$$

将 LCD 光开关面板的一个列的宽度 d (作为物高) 和经过柱透镜单折射柱面成像的光束宽度 D' (作为像高) 代入(5)式, 可得

$$\delta_{Q'} - D' = (1 + m)\delta_c - m(\delta_Q + d), \quad (6)$$

(6)式两端分别减去(4)式两端并整理得

$$m = \frac{D'}{d}, \quad (7)$$

可见, m 为像物垂直放大倍率。根据阿贝(折射)不变量公式, 有

$$n \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{l} \right) = n_0 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{l'} \right), \quad (8)$$

当物点位于物方焦平面时, 有: $l = f$, l' 无穷大, 代入(8)式可得

$$f = \frac{nr}{n - n_0}, \quad (9)$$

式中 f , n 分别为柱透镜的焦距和折射率, n_0 为空气的折射率。由图 2 可以看到, 两个相邻柱透镜都将光束投射到同一个目标区 R^* 或 L^* , 即图 3 中 Q 和 P 两个物点都成像到 Q' 像点处, 由(5)式可得

$$\delta_{Q'} = (1 + m)\delta_c - m\delta_Q = (1 + m)(3\delta_c) - m(\delta_Q + t), \quad (10)$$

式中 t 为 LCD 光开关面板上相邻两 L 列(或 R 列)之间的距离, 进一步整理得

$$t = \frac{1 + m}{m} (2\delta_c). \quad (11)$$

根据图 1 所示柱透镜单元与 LCD 面板图像像素的对应关系, 柱透镜单元宽度 $2\delta_c$ 应与图像像素宽度(像素中心间距) p 一样大, 即 $p = 2\delta_c$, (11)式可写为

$$t = \frac{1 + m}{m} p, \quad (12)$$

(12)式表明 LCD 光开关面板的一对 LR 列与相邻一对 LR 列的间距 t 是 LCD 图像面板像素间距 p 的 $\frac{1+m}{m}$ 倍。

4 参数计算

下面以 55 in(1 in=2.54 cm)4K 电视屏设计为例, 介绍定向背光模块的参数设计。55 in 4K 电视屏的像素中心距离 $p=0.304$ mm。柱透镜光栅是一片由多个完全相同的柱面透镜组成的片状光学元件(光栅板), 出射光的一面是单折射柱面透镜阵列, 背面是一平面, 该平面与 LCD 光开关面板紧密贴合, LCD 位于柱透镜的焦平面上, 这样 LCD 平面上的任意一点经柱透镜折射后均为平行光束。图 4 为柱镜投射光束原理图, 如图 1 和图 4 所示, LCD 光开关面板上 L 和 R 列的间距 t_1 约为 $p/4$, 所以 LCD 光开关面板的列宽度最大值 $d_m=0.076$ mm; 图 4 中令光束宽度 D 为人眼瞳距 $S(65$ mm), 由于 $D' = D - p$, 则柱透镜成像的放大

倍率 $m = D'/d_m = 851.3$; 按聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 光学平板材料取柱透镜折射率 $n \approx 1.5$; 由 (9) 式可得 $f = 3r$, 若视点位置 R^* 或 L^* 的中心点到柱透镜列表面的垂直距离 $l' = 2500$ mm, 将 $l = f = 3r$ 代入 (4) 式可求得 $r = 0.734$ mm, $l = 2.202$ mm, 即设计的 PMMA 柱透镜光栅板厚度为 2.202 mm。根据 (11) 式可得 LCD 光开关面板的 LR 列间距 $t = (1+m)/mp = 0.3044$ mm, $t_1 = t/4 = 0.0761$ mm, $t_2 = t - t_1 = 0.2283$ mm。LCD 光开关面板的列宽度 d 应小于最大列宽度 d_m , 需通过仿真优化设计, 设初始值为 $d = 0.05$ mm。最后得到定向背光 3D 显示模块结构参数如表 1 所示。

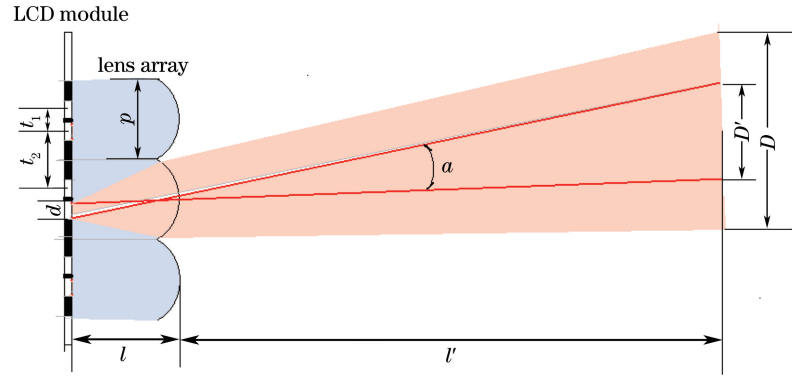


图 4 柱镜投射光束原理图

Fig. 4 Schematic of lenticular beam projection

表 1 55 in 4K 电视屏定向背光 3D 显示模块结构参数

Table 1 Parameters of directional backlight structure of 55 in 4K 3D television screen

Item	Parameter	Value /mm
LCD	t	0.3044
	t_1	0.0761
Panel	t_2	0.2283
	d	0.05
PMMA	r	0.734
	f	2.202
Lenticule	p	0.304
	l	2.202
	l'	2500
Viewing distance	L	2500

5 参数优化与结果分析

5.1 参数优化

根据表 1 的参数建模, 采用光学软件 TracePro 进行模拟仿真实验。LCD 光开关面板的列单元用朗伯型面光源代替, 大小为 $0.05 \text{ mm} \times 0.05 \text{ mm}$, 位于柱透镜的焦平面处。仿真接收屏置于距离柱透镜表面 2.5 m 处, 仿真结果的光强分布曲线如图 5(a) 所示, 图中编号 1~5 对应图 1 中编号 1~5 的 5 个方向光强分布, 其中 1 号、2 号和 3 号位置的左右眼视区 R^* 和 L^* 的光强度分布中心间距约为 65 mm, 与人的双眼瞳距相符, 并且 R^* 和 L^* 的光强度交叠区域面积很小。在 4 号和 5 号位置, 相邻 R^* 和 L^* 的光强度分布中心间距约为 130 mm, 半峰值边缘间距约为 75 mm, 大于双眼瞳距, 所以人眼不会同时看到顺序倒置的左右两幅图像。由图 5(a) 可以看出, 这种光强度分布还存在如下不足: R^* 或 L^* 视区内光强度分布呈现中心大两边小的高斯型分布, 这将导致当两眼偏离中心线时看到的左右视差图像亮度差别很大。因此, 需要对表 1 参数进行优化。由于在设计和制造方面对柱透镜光栅结构形状进行优化以实现平顶光束难度大, 而对 LCD 光开关面板的列单元结构形状进行优化容易实现, 因此参数优化主要针对 LCD 光开关面板。

在图 1 所示的 LCD 光开关面板的列单元中, 设定蝶形宽度 $d = 0.05$ mm, 改变蝶形参数 $\beta = a/d$, 式中 a 为蝶形中心宽度, 仿真结果如图 5(b)~(d) 所示, 可以看到, 随着蝶形参数 β 取值的减小, 光束光强度分布平

顶结构越明显。当 $\beta=1$ 时,1号位置的90%光强宽度约为40 mm,如图5(a)所示;当 $\beta=0.8$ 时,1号位置的90%光强宽度约为48 mm,如图5(b)所示;当 $\beta=0.6$ 和 $\beta=0.4$ 时,1号位置的90%光强宽度均约为55 mm,如图5(c)和(d)所示。继续减小 β 值时1号位置的90%光强宽度基本不变,但最大光强度值下降,所以不再考虑。从图5(a)~(d)同样可以看到2号位置和3号位置的光强度分布变化趋势与1号位置是相同的,都在 $\beta=0.6$ 和 $\beta=0.4$ 时具有最宽90%光强宽度。

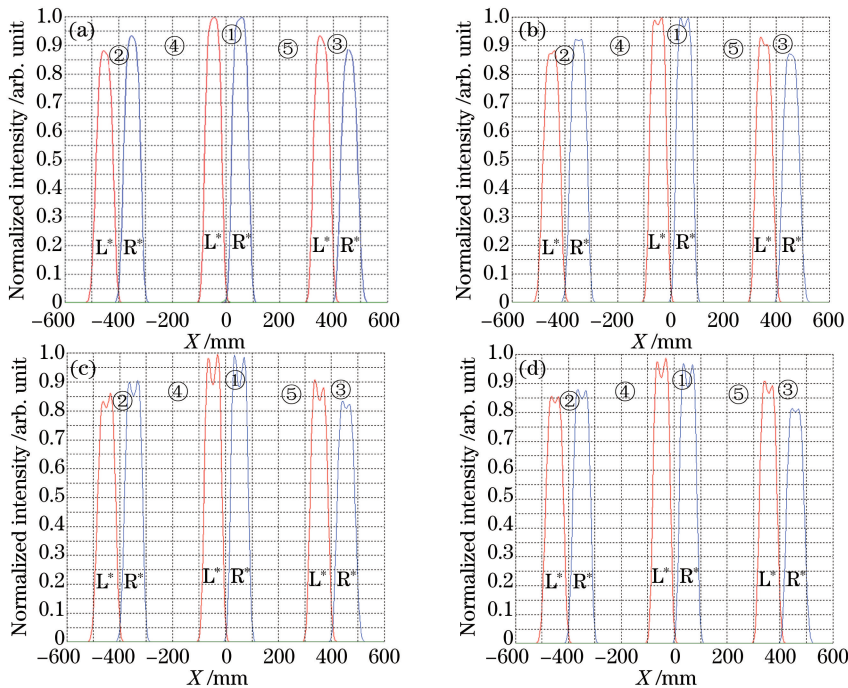


图5 距离屏幕2500 mm处的归一化光强分布。(a) $\beta=1$; (b) $\beta=0.8$; (c) $\beta=0.6$; (d) $\beta=0.4$

Fig. 5 Normalized intensity distributions at distance of 2500 mm away from screen.

(a) $\beta=1$; (b) $\beta=0.8$; (c) $\beta=0.6$; (d) $\beta=0.4$

改变光开关面板单元蝶形宽度 d 进行进一步优化,得到的光强度分布曲线如图6所示。当 $\beta=0.6$ 时,比较图5(c)和图6(a)、(b)可清楚地看到,随着蝶形宽度 d 的减小,左右视差图像投射光束的强度分布交叉面积依次减小,并且 $d=0.03$ mm时交叉面积为0,也就是说左右视差图像完全无串扰。同时也可以看到,实现图像完全无串扰是以牺牲90%光强宽度为代价的,图6中,当 $d=0.04$ mm时,1号位置的90%光强宽度约为35 mm,当 $d=0.03$ mm时,1号位置的90%光强宽度约为24 mm;90%光强宽度的减小会影响视点的观看位置范围(图2中 R^* 和 L^* 视区的面积),因此LCD光开关单元蝶形宽度 d 的选择不宜太小。

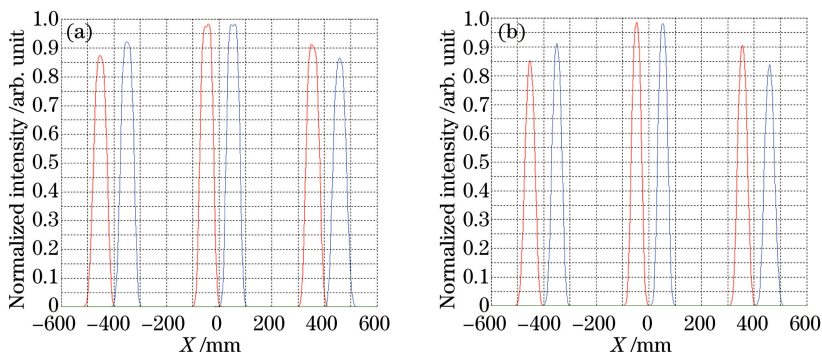


图6 距离屏幕2500 mm处,不同蝶形单元宽度 d 的视场归一化光强分布曲线。

(a) $d=0.04$ mm, $\beta=0.6$; (b) $d=0.03$ mm, $\beta=0.6$

Fig. 6 Normalized intensity distribution curves of butterfly LCD unit with different widths d at distance of 2500 mm away from screen. (a) $d=0.04$ mm, $\beta=0.6$; (b) $d=0.03$ mm, $\beta=0.6$

5.2 串扰分析

串扰的定义为从不需要的视点泄漏过来的光线强度与当前视点光线强度的比值,其计算公式^[16-20]为

$$\alpha = \frac{I_{\text{noise}}}{I_{\text{signal}}} \times 100\%, \quad (13)$$

式中 I_{noise} 是指相邻视点泄露过来的光线强度, I_{signal} 是指当前视点的光线强度。

图 7 为计算得到的优化后的定向背光 3D 显示模块的串扰曲线,取 $\beta=0.6, d=0.05, 0.04, 0.03$ mm, 可以看到,串扰大于 0.5% 的区域小于 10 mm, 1 号观看位置的最低串扰都小于 0.01%, 2 号和 3 号观看位置的最低串扰都小于 0.04%。因此可以认为,当 $\beta=0.6, d \leq 0.05$ mm 时, LCD 光开关单元的串扰都接近 0, 近似无串扰。

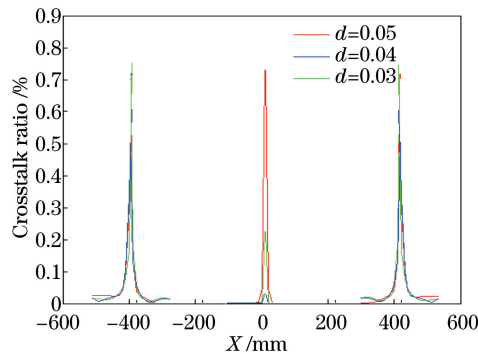


图 7 $\beta=0.6$ 时自由 3D 显示器的串扰分布曲线

Fig. 7 Crosstalk distribution curves of autostereoscopic 3D display with $\beta=0.6$

5.3 左右视差图像亮度偏差分析

自由 3D 显示的左右视差图像亮度偏差是影响 3D 显示效果的重要参数其定义为

$$\delta = \left| \frac{I_L - I_R}{I_L + I_R} \right| \times 100\%, \quad (14)$$

则图 5(a)~(d) 中 1 号位置的亮度偏差值曲线如图 8 所示, 图中横坐标表示右眼(左眼)观看位置偏离 R^* (L^*) 中心点的横向距离, 当蝶形参数 $\beta=1$ 时, 在 R^* (L^*) 可观看范围 ($-30 \sim 30$ mm) 内左右眼图像亮度偏差 δ 最大值为 20%; 当 $\beta=0.8$ 时, δ 最大值为 15%; 当 $\beta=0.6$ 时, δ 最大值为 8%; 当 $\beta=0.4$ 时, δ 最大值为 13%。可见, 蝶型参数对左右眼图像亮度偏差 δ 的影响较大, 选择合适的 β 值有利于改善左右眼图像的亮度偏差, 提高 3D 图像观看效果。由图 8 可见 β 的 4 个取值中 0.6 是最佳参数。

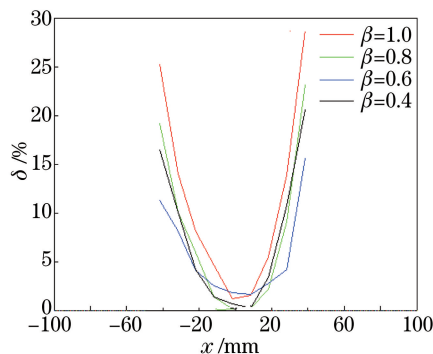


图 8 左右视差图像亮度偏差值 δ 随眼睛所在位置 x 的变化曲线

Fig. 8 Changes of brightness difference δ in parallax images with eye position coordinates x

6 结 论

设计了一种蝶形单元 LCD 光开关面板, 采用定向背光技术实现自由 3D 显示器的无串扰和无分辨率损失。根据几何光学原理, 对 LCD 光开关面板中的列与柱透镜组成的偏轴光学系统进行分析, 推导出柱镜光

栅定向背光 3D 显示系统中蝶形 LCD 单元、柱透镜阵列、LCD 面板图像像素等参数间的计算公式。以 55 in 4K 3D 电视屏的定向背光模块结构参数设计为例,计算了定向背光模块的结构参数,采用 TracePro 软件仿真进行验证和优化,优化后的结构参数为:柱镜光栅的半径 $r=0.734$ mm,厚度 $d=2.202$ mm,节距 $p=0.304$ mm;蝶形 LCD 单元的宽度 $d=0.05$ mm,蝶形参数 $\beta=0.6$ 。模拟仿真结果表明,设计的定向背光自由 3D 显示器在距离 $L=2500$ mm 的接收面上的光强度分布具有平顶特性,90%光强宽度约为 55 mm,串扰大于 0.5%的区域小于 10 mm,最低串扰小于 0.01%,近似无串扰。在单眼可观看范围(-30~30 mm)内左右视差图像亮度偏差 δ 最大值为 8%。本设计的结构方案与现有眼镜快门开关式 3D 视频图像完全兼容,并可方便地进行 3D 和 2D 图像的切换。对于多视点的 3D 显示设计,只需在本结构上增加蝶型单元数量即可。

参 考 文 献

- [1] Zhao Wuxiang, Wang Qionghua, Li Lei, *et al.* Tunable cylindrical liquid lens array for 2D/3D switchable display[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 082301.
赵梧翔, 王琼华, 李 磊. 用于 2D/3D 可切换显示的柱状液体透镜阵列[J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 082301.
- [2] Ezhov V. Optical layout of auto-stereoscopic display that simultaneously reproduces two views each with full-screen resolution[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(36): 8449-8455.
- [3] Wang Aihong, Li Xiaofang, Tao Miaomiao, *et al.* Crosstalk ratio of the lenticular-lens-based autostereoscopic display [J]. *Journal of Henan Normal University (Natural Science)*, 2015, 6: 50-53.
王爱红, 李小方, 陶苗苗, 等. 柱透镜光栅立体显示的串扰度[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 6: 50-53.
- [4] Li Jing, Wang A'ni, Wang Junle, *et al.* Visual discomfort induced by three-dimensional display technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(3): 030009.
李 静, 王阿妮, 王君乐, 等. 三维显示技术引起的视觉疲劳研究综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(3): 030009.
- [5] Xia Zhenping, Li Xiaohua, Chen Lei, *et al.* Study on evaluation of motion blur in binocular parallax based stereoscopic displays[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0111001.
夏振平, 李晓华, 陈 磊, 等. 基于双目视差的立体显示运动模糊评价方法研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0111001.
- [6] Li Xiaofang, Wang Qionghua, Li Dahai, *et al.* A method to eliminate image crosstalk in autostereoscopic display based on lenticular sheet[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2011, 43(6): 115-118.
李小方, 王琼华, 李大海, 等. 一种消除柱透镜光栅自由立体显示图像串扰的方法[J]. *四川大学报(工程科学版)*, 2011, 43(6): 115-118.
- [7] Li D, Zang D, Qiao X, *et al.* 3D synthesis and crosstalk reduction for lenticular autostereoscopic displays[J]. *Journal of Display Technology*, 2015, 11(11): 939-946.
- [8] Wang Q H, Li X F, Zhou L, *et al.* Cross-talk reduction by correcting the subpixel position in a multiview autostereoscopic three-dimensional display based on a lenticular sheet[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(7): 1-5.
- [9] Wang Z Y, Hou C P. Crosstalk elimination in multi-view autostereoscopic display based on polarized lenticular lens array[J]. *Chinese Physics B*, 2015, 24(1): 309-314.
- [10] Fan H, Zhou Y, Liang H, *et al.* Glasses-free 3D display with glasses-assisted quality: key innovations for smart directional backlight autostereoscopy[C]. *Singapore: Visual Communications and Image Processing*, 2015: 1-4.
- [11] Kwon H, Choi H J. A time-sequential multiview autostereoscopic display without resolution loss using a multi-directional backlight unit and an LCD panel[C]. *SPIE*, 2012, 8288: 82881Y.
- [12] Yu Yingjie, Cai Mingyi, Zhang Zhijiang, *et al.* Analysis for geometric parameter relation of lenticular sheet based autostereoscopic[J]. *Optoelectronic Technology*, 2010, 30(1): 10-15.
于瀛洁, 蔡明义, 张之江. 柱透镜光栅自由立体显示中几何参数间关系分析[J]. *光电子技术*, 2010, 30(1): 10-15.
- [13] Fan H, Zhou Y, Wang J, *et al.* Full resolution, low crosstalk, and wideviewing, 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.
- [14] Ren Baichuan. The study on vector aberration theory for off-axis optical system[D]. *Beijing: University of Chinese*

Academy of Science, 2012.

任百川. 偏轴光学系统矢量像差理论研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012.

- [15] Bi Jiayu, Zhang Zhijiang, Dong Zhihua, *et al.* Optical Technique[J]. 2009, 35(4): 575-578.
毕家瑜, 张之江, 董志华. 多视点立体显示系统建模及分析[J]. 光学技术, 2009, 35(4): 575-578.
- [16] Wang Qionghua, Pan Dongdong, Li Dahai, *et al.* Stereoscopic image crosstalk factor for auto-stereoscopic display based on parallax barrier[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2010, 21(7): 1058-1061.
王琼华, 潘冬冬, 李大海, 等. 狭缝光栅自由立体显示器的立体图像串扰度[J]. 光电子·激光, 2010, 21(7): 1058-1061.
- [17] Hou Chunping, Wang Xiaoyan, Crosstalk ratio evaluation of autostereoscopic display based on the slanted parallax barrier[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2012, 45(8): 663-668.
侯春萍, 王晓燕. 基于倾斜狭缝光栅的自由立体显示串扰比[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2012, 45(8): 663-668.
- [18] Hou Chunping, Xu Guo, Shen Lili. Analysis of viewing zone and simulation of the crosstalk based on multi-view autostereoscopic display[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(5): 0512001.
侯春萍, 许 国, 沈丽丽. 多视点自由立体显示串扰分析与视区仿真[J]. 光子学报, 2014, 43(5): 0512001.
- [19] Chen C H, Yeh Y C, Shieh H P D. 3-D mobile display based on Moiré-free dual directional backlight and driving scheme for image crosstalk reduction[J]. Journal of Display Technology, 2008, 4(1): 92-96.
- [20] Saveljev V, Kim S K. Experimental observation of moiré angles in parallax barrier 3D displays[J]. Optics Express, 2014, 22(14): 17147-17157.