

doi:10.3788/gzxb20174605.0522004

消除自由立体显示串扰的定向背光源设计

陈芳萍, 张晓婷, 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:定向背光柱透镜光栅式多视点自由立体显示器的串扰和亮度均匀性问题是影响其广泛应用的主要因素之一. 本文通过分析串扰产生的原因, 根据偏轴光线的成像光学原理, 推导出液晶显示屏光开关板列单元与柱透镜组成的偏轴光学系统的参数计算式. 提出一种液晶显示屏光开关蝶形单元结构, 设计了采用该蝶形单元的定向背光自由立体显示背光源模组. 模拟仿真结果表明: 所设计的定向背光自由立体显示背光源可消除自由立体显示的串扰; 在视点平面 90% 观看区域的串扰度小于 0.5%, 光束 10% 峰值宽度的串扰面积比 $\gamma=0$, 光束 90% 峰值宽度比普通液晶单元结构的增大 37%, 改善了不同位置观看图像亮度变化大的问题.

关键词:自由立体显示; 多视点; 光学仿真; 串扰; 亮度均匀性; 柱透镜光栅

中图分类号: 文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)05-0522004-8

Design on the Directional Backlight of Crosstalk Eliminated Autostereoscopic Display

CHEN Fang-ping, ZHANG Xiao-ting, LIU Chu-jia, QI Yu, ZHUANG Qi-ren

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

Abstract: The brightness uniformity and the crosstalk are the main factors which affect the applicability of the directional backlight lenticular-lens-based multiple autostereoscopic display. In this paper, by analyzing the causes of the generation of the crosstalk, according to the imaging optics principle of off-axis rays, the parameter calculating formula of the off-axis optical system which is consist of Liquid Crystal Display (LCD) panel column unit and cylindrical lens was derived. Then, a structure of butterfly-shaped LCD panel was proposed and used to design the module of the directional backlight autostereoscopic display. The simulation results show that, the directional backlight autostereoscopic 3D display backlight can eliminate the crosstalk. The crosstalk of the autostereoscopic display is less than 0.5% for the 90% viewing area of the view plane, the 10% peak width of the beam crosstalk area ratio is 0. The 90% peak width of the light beam is 1.37 times larger than that of the common liquid crystal cell structure, and the problem on the brightness of the image in different positions is improved.

Key words: Autostereoscopic 3D display; Multi-view; Optical simulation; Crosstalk; Brightness uniformity; Directional backlight

OCIS Codes: 220.0220; 160.3710; 350.2770

0 引言

近年来, 立体显示(3D)技术及其应用成为显示领域的研究热点之一^[1], 其在影视艺术、可视化、虚拟现实、临床诊断等方面有着诱人的发展前景^[2-5]. 凭借不需佩戴辅助式眼镜即可获得立体视觉感受的优势, 自由

基金项目: 福建省科技计划(高校产学研合作)重大项目(No. 2016H6016)和华侨大学研究生科研创新能力培育项目(No. 1511301001)资助

第一作者: 陈芳萍(1991-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为自由立体显示. Email: 861040852@qq.com

导师(通讯作者): 庄其仁(1960-), 男, 教授, 学士, 主要研究方向为照明与显示技术和光电检测技术. Email: qrzhuang@hqu.edu.cn

收稿日期: 2016-12-06; 录用日期: 2017-02-20

<http://www.photon.ac.cn>

立体显示被视为立体显示的未来主流方向之一. 目前, 自由立体显示方式主要有 3 种: 视差立体、体立体和全息立体. 基于双目视差的光栅式自由立体显示器主要包括狭缝光栅式自由立体显示器和柱透镜光栅式自由立体显示器. 由于自由立体显示技术本身的限制, 光栅式自由立体显示器存在诸如分辨率下降, 串扰率高, 观看角度受限, 及立体显示不清晰等问题, 从而限制了它的广泛应用. 因此, 针对此类问题, 研究人员提出了各种解决方案^[6-9]. 立体串扰是指左右图像信息相互泄露而混叠, 从而导致立体效果减弱或者消失, 并引起观看者视觉上明显的不舒适. 针对串扰问题, 研究人员提出了各种解决方案, 如从偏振透镜阵列、软件编码、LCD (Liquid Crystal Display) 像素刷新以及光学模组^[10-11]等方面提出了一些串扰减弱办法, 通过遗传算法来优化改善柱透镜参数以降低串扰^[13]. 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.

光栅式自由立体显示技术主要有 3 种: 柱透镜式、狭缝光栅式和定向背光式. 由于图像像素被分为若干个视点的子像素, 随着视点数的增多, 其柱透镜及狭缝光栅式显示分辨率损失越严重. 定向时分背光自由立体解决方案可以保持液晶面板的原有分辨率不变, 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, 因此, 定向时分背光 3D 显示技术在宽视角、低串扰等方面还需要进一步优化, 如苏剑邦^[13]等提出通过时空混合控制来实现全分辨率和低串扰. 本文基于 LCD 光开关、柱透镜阵列和均匀背光源的多指向背光模组^[14], 分析了串扰产生的原因, 提出一种蝶形单元 LCD 光开关, 设计了消除串扰的定向背光光源模组.

1 蝶形 LCD 单元定向背光原理

如图 1, 定向背光自由立体显示光源模组由均匀背光源、LCD 调制器(光开关板)和柱透镜阵列组成, LCD 图像面板置于柱透镜阵列前并紧贴柱透镜放置. 根据透镜阵列的光学性质, LCD 光开关板中的列对应着特定的光投射方向. 图 1 中显示了一种 4 个方向的背光设计, 在每个小透镜下有 4 个列, 每列都在设定的方向上产生一个准直光束, 分时打开 LCD 光开关板的列就能产生顺序变化方向的背光输出, 为了使视点区域的光强分布均匀, 应使光束接近平顶光束, 为此将 LCD 光开关板中的 LCD 单元设计成纵向中间窄两边宽的蝶形结构, 如图 1. 图 1 中蝶形单元 1 对应光束 1, 蝶形单元 2 对应光束 2, 以此类推. 轮流打开 LCD 光开关板的蝶形单元 1、2、3、4, 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, 并使视点图像的切换与背光方向的变化同步, 就可实现在设定的方向上产生 3D 显示效果. 采用蝶形 LCD 开关单元设计的主要优势在于它能使光束的中心强度降低, 将原来近似高斯分布的光束变为近似平顶光束, 光束强度分布较均匀, 便于实现低串扰设计.

2 串扰模型

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受到不是当前所要观看的对应视差图像的光线. 在定向背光 3D 显示中, 视差图像的光束指向由定向背光源决定, 因此只需考虑定向背光源投射光束间的串扰. Son^[15]等提出, 视区的形状为菱形. 随着屏幕尺寸的增加, 立体视区范围在减小, 主要表现为菱形立体视区的水平宽度几乎不变, 但垂直宽度变窄. 这是因为随着屏幕像素的增加, 不同视点间发生串扰的范围增加, 使可视区域减低. 所以本文的分析集中在垂直方向上.

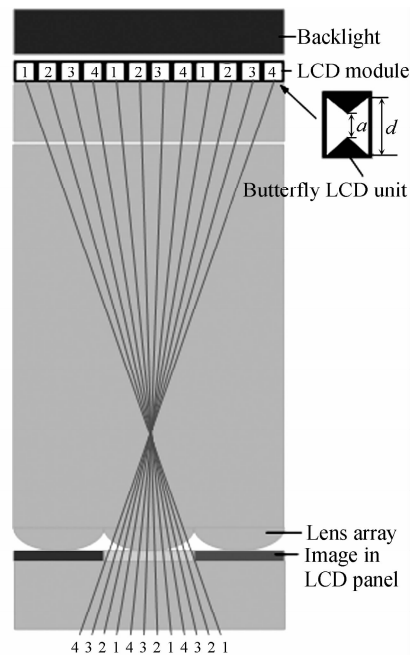


图 1 采用蝶形 LCD 调制器和柱透镜阵列的多指向背光原理图

Fig. 1 The schematic of the multi-directional backlight unit with a butterfly LCD module and lens array

图 2 所示为 LCD 屏幕宽度为 W , 对应相邻两幅图像的 LCD 光开关板中 1 和 2 两光束投射到距离为 l' 的视点位置 1^* 和 2^* 的光路示意图, 其中 1^* 和 2^* 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 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 1^* 和 2^* 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 1^* 和 2^* 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.

通常, 采用串扰度^[16-18]来定量地描述串扰, 它是指在观看视点处(菱形区域)测量来自串扰全亮图像的亮度与来自本视点全亮图像的亮度之间的比值. 设背光源均匀发光, LCD 光开关板各列在每个视点方向的投射准直光束强度相同, 光束强度分布函数为 $I(y_i)$, 同时受到环境光的影响相同, 那么人眼在视点菱形区域看到的图像串扰度可用像素列投射准直光束的强度叠加计算, 如图 3, 图中 i_1^* 和 i_2^* 分别为 LCD 显示器上第 i 个像素列投射到 1^* 和 2^* 的准直光束(图中 j_1^* 表示第 j 个像素列投射到 1^* 的准直光束). 若 LCD 显示器有 N 列像素, 对于 K 个视点的全亮图像所有像素列光束投射在菱形区域的叠加光强度可近似表示为

$$I_{1^*} = \sum_{i=1}^N [I(y_{i_1^*}) + \sum_{k=1}^{K-1} I(y_{i_2^*} + kS)] \quad (2)$$

串扰度为

$$CR = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{K-1} I(y_{i_1^*} + kS)}{\sum_{i=1}^N I(y_{i_2^*})} \times 100\% \quad (3)$$

对于 LCD 开关单元出射光束, 实验测得其归一化光强分布如图 4 中实验曲线所示. 与高斯分布(如图 4 中理论曲线)很接近, 因此像素列投射光束强度分布表达式为

$$I(y_i) = I_{0i} \exp\left(-\frac{y_i^2}{(D/2)^2}\right) \quad (4)$$

式中 D 为光束宽度.

光束高斯分布的图像串扰度可写为

$$CR = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{K-1} I_{0i_1^*} \exp\left(-\frac{(y_{i_1^*} + kS)^2}{(D/2)^2}\right)}{\sum_{i=1}^N I_{0i_2^*} \exp\left(-\frac{y_{i_2^*}^2}{(D/2)^2}\right)} \times 100\% \quad (5)$$

另外, 如图 3, 串扰程度还可以用串扰面积比 γ 表示为

$$\gamma = \frac{(D-S)^2}{S^2} \quad (D > S) \quad (6)$$

若第 i 个像素列投射的准直光束中心偏离视点菱形中心为 Δy_i , 则引起的光束串扰面积比可表示为

$$\gamma = \sum_{i=1}^N \frac{(D + |\Delta y_i| - S)^2}{S^2 N} \quad (7)$$

可见, 定向背光 3D 显示中的串扰影响程度取决于光束宽度 D 和光束投射角度的精度, 当 $D < S$ 及光束投射位置无偏离时, 在视点菱形区域内图像的理想串扰度为 0, 即没有串扰现象. 因此, 控制定向背光 3D 显示中的像素列光束宽度 D 和光束偏离值 Δy_i 是消除视点菱形区域图像串扰的关键技术.

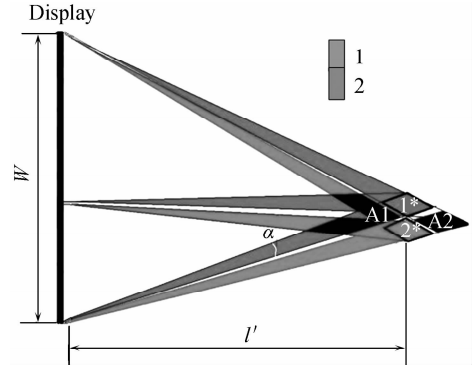


图 2 相邻两幅图像的像素列定向投射光束示意图
Fig. 2 The diagram of directional projection beams of two adjacent pixel column

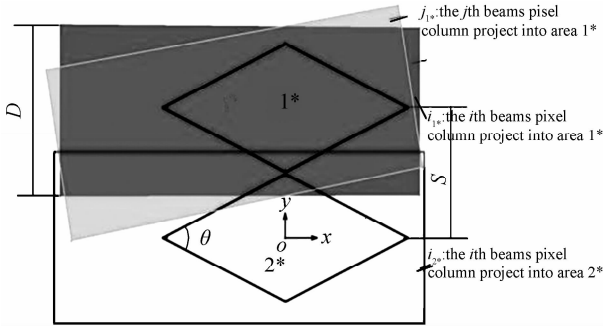


图3 串扰度计算模型示意图
Fig. 3 The schematic of the calculation model for crosstalk

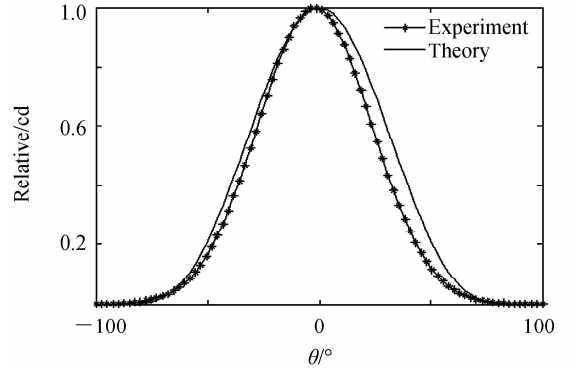


图4 像素列出射光束的光强分布
Fig. 4 Distribution of illumination intensity for outgoing beam of pixel column

3 柱透镜光学系统设计方法

在定向背光 3D 显示系统中,定向准直光束的光源为 LCD 光开关板的液晶列,设液晶列的透光宽度为 d ,柱透镜阵列采用常规柱透镜,其横截面为圆弧,见图 5. LCD 光开关板中的列与柱透镜组成偏轴光学系统^[18].

图 5 所示为 LCD 光开关板的一个列经过偏心的单折射柱面成像示意图,参考轴设置在两个柱面透镜的交界处, δC 为参考轴到柱面透镜曲率中心的距离, Q 为某一列的边沿, Q' 为对应像面光束边沿,为一对共轭点, δQ 、 $\delta Q'$ 分别代表物象边沿相对于参考轴的偏移量.根据相似三角形可得

$$\frac{\delta Q' - \delta c}{l' + r} = \frac{\delta c - \delta Q}{l - r} \quad (8)$$

即

$$\delta Q' = \delta c + \frac{l' + r}{l - r} (\delta c - \delta Q) \quad (9)$$

令

$$\frac{l' + r}{l - r} = m \quad (10)$$

则式(9)可写为

$$\delta Q' = (1 + m)\delta c - m\delta Q \quad (11)$$

将 LCD 光开关板的一个列宽度 d (作为物高),经过柱透镜单折射柱面成像的光束宽度 D' (作为像高)代入式(11),可得

$$\delta Q' - D' = (1 + m)\delta c - m(\delta Q + d) \quad (12)$$

式(12)两端减式(11)两端并整理得

$$m = \frac{D'}{d} \quad (13)$$

可见, m 为像物垂直放大倍率.根据阿贝(折射)不变量公式,有

$$\frac{n}{l} - \frac{n_0}{l'} = \frac{n - n_0}{r} \quad (14)$$

当 LCD 光开关单元位于柱透镜光栅焦平面时, $l = f, l' = \infty$,代入式(14)可得

$$f = \frac{nr}{n - n_0} \quad (15)$$

在图 5 中,若 Q 点向上移动到同一个视点的下一个列周期位置 $t + \delta Q$,再经过曲率中心与参考轴的距离为 $3\delta c$ 的相邻柱透镜成像,同样将光束投射到 Q' 点,则由式(11)可得

$$\delta Q' = (1+m)(3\delta c) - m(t + \delta Q) \quad (16)$$

式(11)和式(16)两边相减并整理得

$$t = \frac{(1+m)}{m}(2\delta c) = \frac{(1+m)}{m}b \quad (17)$$

式中 b 为柱透镜光栅阵列的单元宽度(光栅节距).根据图 1 所示柱透镜单元与 LCD 面板图像像素的对应关系,柱透镜光栅节距应与 LCD 图像像素宽度(像素中心间距)相同,即像素间距也为 b ,因此,式(17)表明,LCD 光开关板上相同视点的列间距 t 是 LCD 图像面板像素间距 b 的 $\frac{1+m}{m}$ 倍.

又每一个柱透镜单元内包含 K 个视点开关单元,所以 LCD 调制开关板的列间距为

$$t_1 = \frac{t}{K} = \frac{(1+m)}{mK}b \quad (18)$$

如图 6,柱透镜光栅阵列的节距 b 与 LCD 图像面板的像素间距一致,该参数由 LCD 图像面板的像素决定.像物垂直放大倍率 m 由两眼瞳距和 LCD 调制开关板的列间距确定,由式(13)计算,柱透镜阵列厚度 l (即物方焦距 f)、柱透镜的曲率半径 r 、LCD 开关板的蝶形单元列间距 t_1 根据式(15)和式(18)求得.

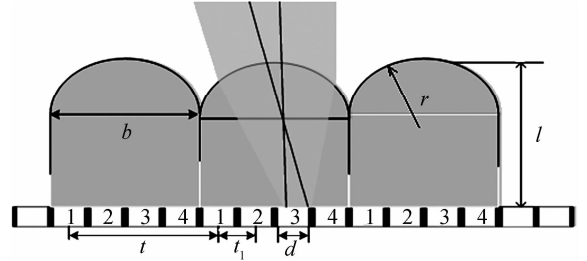


图 6 柱透镜光栅阵列结构参数示意图
Fig. 6 The schematic of the structure parameters of cylindrical lens arrays

4 仿真与结果分析

以 55 英寸 4K 电视屏设计为例,介绍定向背光源模组的参数设计.55 英寸 4K 电视屏的像素列间距约为 $b=0.304$ mm,如图 1 和图 5 所示,LCD 光开关板上有 4 个像素列, $K=4$,列间距 $t_1 \approx \frac{b}{4} = 0.076$ mm,因此,液晶列的透光宽度最大值为 $d_m=0.076$ mm,令观看位置光束宽度 D' 为人眼瞳距 $S(65$ mm),则柱透镜

成像的放大倍率为 $m = \frac{D'}{d_m} = 855.3$,根据式(18)算

出 LCD 光开关板的单元列间距 $t_1=0.076$ 1 mm.柱透镜的曲率半径 r 和厚度 f 的关系用式(15)计算,其中 n 为 PMMA 光学平板材料的折射率,取 $n \approx 1.5$,得 $f=3r$,此时 LCD 光开关单元位于柱面透镜的焦平面上,有 $f=l$,设定观看距离 $l'=2\ 000$ mm,再根据式(10),算出柱透镜曲率半径以及焦距(柱透镜光栅厚度),见表 1 所示.LCD 光开关板的单元透光宽度 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.

采用光学软件 Tracepro 对表 1 中的参数进行仿真验证,LCD 光开关板的液晶单元用高斯型面光源代替,首先采用传统液晶单元形状,大小为 0.05 mm \times 0.05 mm,放在柱透镜的焦平面处.按照 4K 电视水平分辨率 3 840 pixel 列进行模拟仿真,仿真接收屏置于距离柱透镜表面 2.0 m 处,仿真结果的光强分布曲线如图 7(a).由图中曲线可知,不同视点的光强分布是分开的,交叠部分很少,即相对串扰比较小,且相邻两视点的最大光强位置相距 65 mm 左右,与人的双眼瞳距相符,仿真结果表明采用表 1 参数设计的定向背光源模组能满足低串扰要求,同时证明了上述柱透镜光学系统的设计方法和公式是正确的,设计的定向背光源模组能够很好地控制定向背光 3D 显示中的像素列光束宽度 D 和光束偏离值 Δy_i .但图 7(a)的视点光强分布曲线为高斯型分布,视点内不同位置的观看亮度相差很大.

表 1 55 英寸 4K 电视屏定向背光源结构参数
Table 1 Parameters of the directional backlight of 55 inches 4K screen

Parameter	Value
t /mm	0.304 4
t_1 /mm	0.076 1
d /mm	0.050 0
r /mm	1.169 8
f /mm	3.509 4
b /mm	0.304 0
n	1.50
l' /mm	2 000

为解决上述视点亮度变化大的问题,本文提出一种改进方法,将 LCD 光开关板的液晶单元形状设计为蝶形,如图 1,先设定蝶形宽度 $d=0.05\text{ mm}$,然后改变蝶形参数 $\beta=a/d$,这里 a 为蝶形中心宽度,仿真结果如图 7(b)~(d). 结果分析:从图 7(a)~(d)可以看到,随着蝶形参数 β 取值的减小,各视点的中心光强分布趋于平坦,光强 90%峰值宽度随着增大. $\beta=0.6$ 和 $\beta=0.4$ 时视点 1~4 的光强度分布平顶结构已很明显. 此时视点 1 的光强 90%峰值宽度约为 36 mm,如图 7(c)、(d)所示,比传统液晶单元结构($\beta=1$)得到的视点光强 90%峰值宽度(约为 26 mm)增加了 37%. 继续减小 β 值,各视点的光强 90%峰值宽度基本不变,但最大光强度值下降,所以不再考虑.

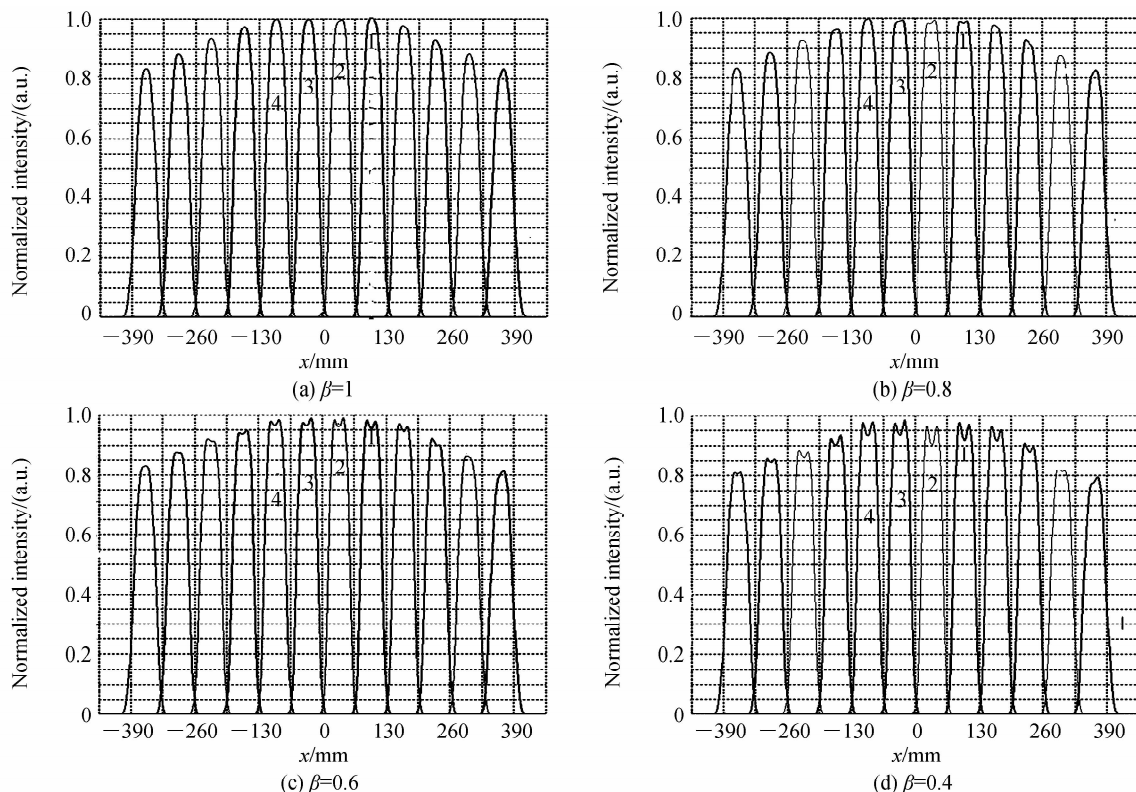


图 7 距离屏幕 2 000 mm 处的光强分布

Fig. 7 Normalized intensity at the distance of 2 000 mm away from the display

LCD 光开关蝶形单元宽度 d 对视点光强分布的影响仿真结果如图 8. 当 $\beta=0.6$ 时,减小蝶形单元宽度 d 可使视点间的光强度分布交叉面积减小,并且在 $d=0.03\text{mm}$ 时交叉面积基本为 0,也就是视差图像完全无串扰. 但这是以牺牲光强 90%峰值宽度为代价的,在图 8 中,当 $d=0.04\text{mm}$,视点 1 的光强 90%峰值宽度约为 23mm;当 $d=0.03\text{mm}$,光强 90%峰值宽度约为 16mm,光强 90%峰值宽度的减小会影响视点的观看位置范围,因此 LCD 光开关单元蝶形宽度 d 的选择不宜太小.

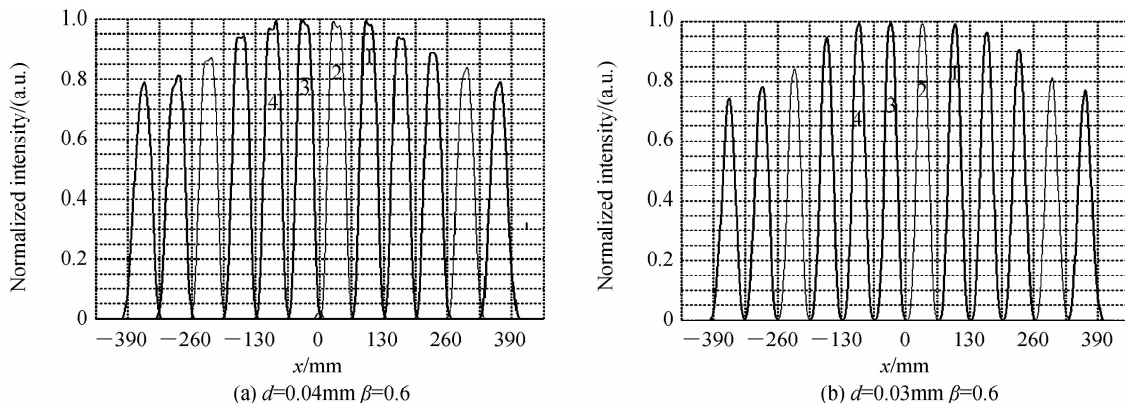


图 8 不同蝶形单元宽度 d 的视场光强分布曲线

Fig. 8 Normalized intensity distribution curves of the butterfly LCD unit with different width d

对蝶形光开关单元宽度 $d=0.04\text{ mm}$, 蝶形参数 $\beta=0.6$, 计算了在观看平面($-130\sim 130\text{ mm}$)的视差图像串扰度, 结果如图 9. 从图中可以看出, 90% 观看区域的串扰度小于 0.5%, 在两视点交界区域(坐标为 -130 mm 、 -65 mm 、 0 mm 、 65 mm 、 130 mm)的串扰较大. 由图 6~8 还可以得到, 若以 10% 峰值宽度作为视点 1~4 的光束宽度, 则 $D\approx 60\text{ mm}$, 满足 $D<S(65\text{ mm})$ 条件, 由式(6)可知相邻两视点菱形区域串扰面积比 $\gamma=0$, 可看作理想无串扰情况.

根据文献[11, 20]的报道, 左右视差图像串扰度大于 25% 会引起视觉不适. 由图 9 可见, 这里视区串扰度均小于 5%, 不会引起观看者视觉上的不舒适. 另外, 自由立体显示的左右视差图像亮度偏差是影响立体显示视觉舒适度的重要参数, 当观看者的左右眼图像亮度不匹配时, 会降低视觉舒适度. 左右视差图像相对于亮度平均值的偏差作为相对亮度偏差值 δ , 即

$$\delta = \left| \frac{I_L - I_R}{I_L + I_R} \right| \times 100\% \quad (20)$$

一般认为, 相对亮度偏差值 δ 大于 25% 会引起视觉不适.

对蝶形光开关宽度 $d=0.04\text{ mm}$, 计算了在观看平面($-65\sim 65\text{ mm}$)的视差图像的亮度偏差值, 结果如图 10. 从图中可以看出, 图中横坐标表示右眼(左眼)观看位置偏离中心点的横向距离, 当蝶形参数 $\beta=1$ 时, 在可观看范围($-15\sim 15\text{ mm}$)左右眼图像亮度偏差 δ 最大值为 15%, 当 $\beta=0.8$ 时, δ 最大值为 10%, 当 $\beta=0.6$ 时, δ 最大值为 5%, 当 $\beta=0.4$ 时, δ 最大值为 12%. 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.

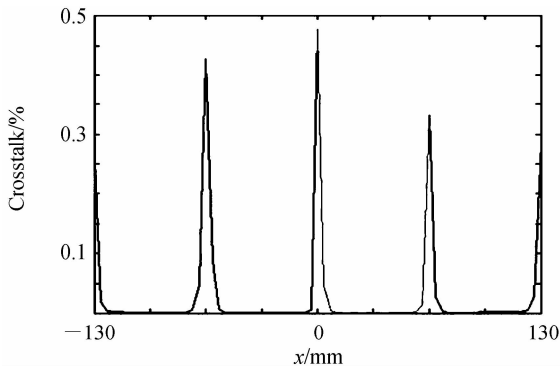


图 9 自由立体显示器的串扰分布曲线
Fig. 9 Crosstalk ratio distribution of the autostereoscopic 3D display

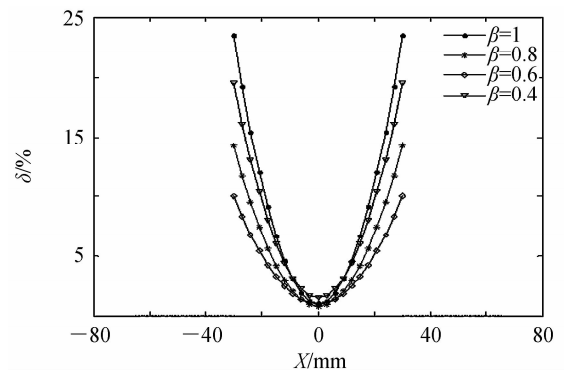


图 10 左右视差图像亮度偏差值 δ 随眼睛所在位置 x 的变化曲线
Fig. 10 The brightness difference δ in parallax images changes with eye position coordinates x

4 结论

在定向时分背光自由立体显示器设计中, 采用均匀背光源、蝶形单元 LCD 光开关板和柱透镜光栅阵列组成的模组作为定向背光源, 通过分析光束串扰模型和偏轴光学系统成像模型, 得到定向背光源模组参数设计公式, 以 55 英寸 4K3D 电视屏的定向背光模组结构参数设计为例, 采用 TracePro 软件仿真进行验证和优化, 优化后的结构参数为: 柱透镜光栅半径 $r=0.734\text{ mm}$ 、厚度 $l=2.202\text{ mm}$ 、节距 $b=0.304\text{ mm}$; 蝶形 LCD 单元宽度 $d=0.05\text{ mm}$ 、蝶形参数 $\beta=0.6$. 模拟仿真结果表明, 设计的蝶形单元定向背光源在距离 $L=2\ 000\text{ mm}$ 的视点平面上的光强度分布具有平顶特性, 光强 90% 峰值宽度约为 35 mm, 比普通矩形单元定向背光源的光强分布宽度增大了 37%, 改善了视点不同位置观看亮度变化大的问题; 而且, 最大串扰度小于 0.5%, 10% 峰值宽度光束串扰面积比 $\gamma=0$, 消除了自由立体显示的串扰问题.

参考文献

- [1] SHEN Y T, LIU G L, WU S S, *et al.* 3-D perception enhancement in autostereoscopic TV by depth cue for 3-D model interaction[C]. IEEE International Conference on Consumer Electronics, IEEE, 2016: 279-282.
- [2] KANG K, HANG S, YOON J, *et al.* Autostereoscopic display with a shifted LC barrier structure for a wide viewing zone[C]. Ivmsp Workshop, 2013 IEEE, IEEE, 2013: 1-4.
- [3] ZHANG X, CHEN G, LIAO H, *et al.* High quality see-through surgical guidance system using enhanced 3D

- autostereoscopic augmented reality[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2016, PP(99): 1-1.
- [4] HUANG Qing-min. Multi-view naked eye 3D TV technology[J]. *International Electronic Elements*, 2015, **23**(3): 191-193.
黄庆敏. 多视角裸眼 3D 电视的技术实现[J]. 电子设计工程, 2015, **23**(3): 191-193.
- [5] SU Ping, CAO Cong, MA Jian-she, MAO Jie, *et al.* Multi-view 3D display system for autostereoscopic LED displays [J]. *International Electronic Elements*, 2016, **24**(3): 160-162.
苏萍, 曹聪, 马建设, 等. 用于裸眼 3D LED 显示的多视区 3D 视频播放系统[J]. 电子设计工程, 2016, **24**(3): 160-162.
- [6] LIN Dai-kun, LIANG Wei-tang, LIANG Hao-wen, *et al.* Spatially and temporally seamless autostereoscopic display technology research based on face-tracking[J]. *TV Engineering*, 2015, **39**(5): 70-73.
林岱昆, 梁伟棠, 梁浩文, 等. 基于人脸跟踪的时空无缝裸眼 3D 显示技术研究[J]. 电视技术, 2015, **39**(5): 70-73.
- [7] KIM C, KIM J, SHIN D, *et al.* Electrowetting lenticular lens for a multi-view autostereoscopic 3D display[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, **28**(22): 2479-2482.
- [8] XUE Ya-lan, WANG Yuan-qing; CAO Li-qun, *et al.* Backlight control system of autostereoscopic display with less crosstalk[J]. *Electronics Optics&Control*, 2014, **21**(7): 69-72.
薛亚兰, 王元庆, 曹利群, 等. 自由立体显示中降低串影干扰的背光控制系统[J]. 电光与控制, 2014, **21**(7): 69-72.
- [9] NETZBANDT R, BARRE R D L. Determination of qualified spaces at two-view autostereoscopic displays from one-point luminance profile measurements[J]. *Journal of Display Technology*, 2016, **12**(12): 1732-1737.
- [10] LEE C, SEO G, LEE J, *et al.* Auto-stereoscopic 3D displays with reduced crosstalk[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(24): 24762-24774.
- [11] HANHART P, Nolfo C D, Ebrahimi T. Active crosstalk reduction system for multiview autostereoscopic displays[C]. IEEE International Conference on Multimedia and Expo. IEEE, 2015: 1-6.
- [12] LIANG H, AN S, WANG J, *et al.* Optimizing time-multiplexing auto-stereoscopic displays with a genetic algorithm [J]. *Journal of Display Technology*, 2014, **10**(8): 695-699.
- [13] SU Jian-bang, LIANG Hao-wen, CHEN Hai-yu, *et al.* Optimization of backlight scanning on auto-stereoscopic display with spatial and sequential hybrid control[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, **30**(5): 877-882.
苏剑邦, 梁浩文, 陈海域, 等. 时空混合控制式自由立体显示系统背光刷新方式优化研究[J]. 液晶与显示, 2015, **30**(5): 877-882.
- [14] KWON H, CHOI H J. A time-sequential multi-view autostereoscopic display without resolution loss using a multi-directional backlight unit and an LCD panel[C]. SPIE, 2012, 8288.
- [15] SON J Y, SAVELJEV V V, KIM J S, *et al.* Viewing zones in three-dimensional imaging systems based on lenticular, parallax-barrier, and microlens-array plates. [J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(26): 4985-92.
- [16] LIOU J C, LEE K, HUANG J F. Low crosstalk multi-view tracking 3-D display of synchro-signal LED scanning backlight system[J]. *Journal of Display Technology*, 2011, **7**(8): 411-419.
- [17] WANG L, TU Y, CHEN L, *et al.* Cross-talk acceptability in natural still images for different (auto) stereoscopic display technologies[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2010, **18**(6): 405 - 414.
- [18] WANG L, TEUNISSEN K, TU Y, *et al.* Crosstalk evaluation in stereoscopic displays[J]. *Journal of Display Technology*, 2011, **7**(4): 208-214.
- [19] REN Bai-chuan. The study on vector aberration theory for off-axis optical system[D]. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2012.
任百川. 偏轴光学系统矢量像差理论研究[D]. 长春: 中国科学院大学(长春光学精密机械与物理研究所), 2012.
- [20] ZHANG Jing. Comfort performance of stereoscopic displays and research on motion-in-depth based ERP[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
张晶. 立体显示器的舒适度性能及基于 ERP 的深度运动研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.