

# 基于蝶形液晶开关获得自由立体显示的定向背光平顶光束研究

陈芳萍, 张晓婷, 庄其仁, 刘楚嘉, 漆宇, 吴逢铁

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** 研究了一种采用蝶形液晶开关获得柱透镜式定向背光横向平顶光束的原理和方法,在广义惠更斯-菲涅耳衍射积分理论的基础上,推导出以蝶形液晶开关单元为光源的光束经柱透镜后的衍射光场分布表达式;将蝶形液晶开关单元置于柱透镜的物方焦平面上,利用 MATLAB 编程模拟不同焦距柱透镜下的横向光场能量分布曲线,并分析了蝶形参数对横向光场能量分布的影响。结果表明,随着蝶形参数减小,横向衍射光场能量均匀度先增大后减小,存在一个蝶形参数值可使能量均匀度达到最大值。

**关键词** 衍射; 平顶光束; 蝶形液晶开关; 柱透镜; 自由立体显示; 衍射理论

**中图分类号** TN312.8 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.111413

## Directional Backlight Flattop Beam Obtained by Butterfly Liquid Crystal Switch for Autostereoscopic Display

Chen Fangping, Zhang Xiaoting, Zhuang Qiren, Liu Chujia, Qi Yu, Wu Fengtie

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

**Abstract** We study the principle and method of obtaining cylindrical lens type directional backlight flattop beam by using a butterfly liquid crystal switch. Based on the generalized Huygens-Fresnel diffraction integral theory, we deduce the diffraction field distribution expression of beam after passing through cylindrical lens, and the butterfly liquid crystal switch unit is the light source of the beam. Placing the butterfly liquid crystal switch unit on the cube focal plane of the cylindrical lens, we simulate transverse optical field energy distribution curves at cylindrical lens with different focal lengths by MATLAB programming, and analyze the influence of butterfly parameter on the transverse optical field energy distribution. The results show that the energy uniformity of the transverse diffraction field energy firstly increases and then decreases with the reduction of the butterfly parameter, thus there exists a butterfly parameter that can maximize the energy uniformity.

**Key words** diffraction; flattop beam; butterfly liquid crystal switch; cylindrical lens; autostereoscopic display; diffraction theory

**OCIS codes** 140.3300; 050.1970

## 1 引言

立体显示技术具有高度临场感,能给观众带来无与伦比的立体视觉享受,因此一直是显示技术领域的研究热点。以往的立体显示技术需要借助立体眼镜、头盔显示器等辅助视具,影响了其更好的推广和应用;而自由立体显示技术突破了这种局限性,使观众能够在较大角度内的多个位置用裸眼自由、清晰地感受到立体

**收稿日期:** 2017-06-10; **收到修改稿日期:** 2017-07-15

**基金项目:** 福建省高校产学研合作科技重大项目(2016H6016)、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,教授,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)

画面带来的视觉冲击,从而极大地推动了立体显示技术的发展和应<sup>[1-3]</sup>。自由立体显示技术主要有柱透镜光栅式、狭缝光栅式和定向背光式立体显示。基于柱透镜光栅和狭缝光栅的自由立体显示技术因技术比较实用、立体显示效果比较出众而成为当前的研究热点和主要方向<sup>[4]</sup>;但光栅式显示技术也有其本身亟待解决的技术瓶颈,例如亮度和分辨率较低、相邻视点间串扰严重、观看视角受限、裸眼立体视频片源很少、片源制作成本较高、对位贴合的精度要求高和贴合成本高等。采用定向背光自由立体显示不仅能保持液晶显示器(LCD)面板的原有分辨率,而且对 LCD 像素对齐、贴合的要求较低。Fattal 等<sup>[5]</sup>提出了光栅型多视点定向背光,实现了视区内的视差立体显示。但定向背光在解决分辨率损失问题的同时也存在其自身的缺点:一是背光源为发散角很大的均匀面光源,不同像素的多个角度光线会同时进入视点区域,形成严重串扰;二是分时打开液晶光调制器,对于  $N$  视点方案( $N$  为视点数量),其图像显示亮度将降低为原来的  $1/N$ 。针对定向背光的串扰问题,研究者提出了各种解决方案:Feng 等<sup>[6]</sup>使用定向背光分束器阵列来实现低串扰的立体显示;Zhuang 等<sup>[7]</sup>设计了一组圆柱透镜阵列,并将其作为背光转向;Fan 等<sup>[8-9]</sup>通过设计自由背光曲面结构来减少串扰。针对亮度损失问题,Li 等<sup>[10]</sup>、Liou 等<sup>[11-12]</sup>提出了将传统冷阴极射线管背光源换成 LED 光源,并将 LED 光源作为动态背光模块的方案。

传统的定向背光显示在特定的视点位置可以实现很低的串扰,但其光强呈高斯分布,且高斯光束的强度过于集中在中心部分,观看者眼睛一旦偏离视点中心位置就会感受到明显的屏幕亮度变化,易产生不适。因此,在立体显示中,要求每一个视点的视区横向光强保持不变,即要求定向光束为平顶光束。如何获得平顶光束一直是研究人员关注的课题。目前获得平顶分布光束的实验方法有很多,但主要都是针对激光光束的整形方法<sup>[13-14]</sup>。比较常见的光束整形方法有光阑拦截法、相位型光束整形法、透射率为反高斯分布的吸收滤光镜法、衍射光学元件法、LCD 空间光调制器法和非球面透镜组法等。此外,Gao 等<sup>[15]</sup>提出了用六角排列的若干高斯光源经相干合成平顶光束的方法,赵保银等<sup>[16]</sup>提出了用离焦望远镜系统合成轴上平顶光束的方法。为了研究只需在水平方向上是平顶的自由立体显示的定向背光横向一维光束,本文设计了一种蝶形液晶开关,基于广义惠更斯-菲涅耳衍射积分理论研究了以蝶形单元为面光源的光线经柱透镜后的光场分布特性。

## 2 原 理

图 1 所示为横向平顶光束定向背光自由立体显示原理图,是基于定向背光源高分辨率立体显示原理<sup>[17]</sup>改进的光路图。定向背光自由立体显示主要包括均匀背光源、蝶形 LCD 开关单元阵列、柱透镜阵列,以及可以快速切换的 LCD 图像面板。柱透镜阵列竖直放置。LCD 图像面板置于柱透镜前并紧贴柱透镜放置, LCD 光开关置于柱透镜的焦平面上,这样 LCD 光开关上任意一点发出的光束经柱透镜折射后在水平方向(即横向)上都可视作平行光束。由于 LCD 光开关单元具有一定宽度,因此同一 LCD 光开关单元上的全部发光点发出的光线经柱透镜后可形成具有一定发散角的准平行光束。如图 1 所示,1 个柱透镜对应的 4 个光开关单元发出的光线经柱透镜折射后产生了 4 个方向的准平行光束,4 个光开关单元依次轮流工作,对应 LCD 图像屏幕上的 4 幅视差图像,视差图像的切换与 LCD 光开关同步,从而使观看者的左眼和右眼接受到不同的图像内容,这些图像内容经人脑融合后形成三维图像。为了使人眼在视点区域内左右移动时不会看到屏幕亮度的明显变化,视点区域的光强分布需要是均匀的,即图 1 中 4 个方向的准平行光束是横向平顶光束。将图 1 中背光源前的 LCD 单元设计成竖直方向上中间高度小于两边高度的蝶形结构,就可以使柱透镜输出横向平顶光束。

## 3 理论模型

### 3.1 蝶形 LCD 光源模型

液晶开关单元的蝶形结构如图 2 所示。通光面积形状为蝶形,蝶形的宽度和最大高度均为  $d$ ,中心高度为  $a$ 。定义蝶形参数  $\beta$  为中心高度  $a$  与蝶形宽度  $d$  的比值,即  $\beta = a/d$ ,蝶形的 6 个边分别为 2 个直边和 4 个斜边,斜边  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$ 、 $l_4$  的线性方程为

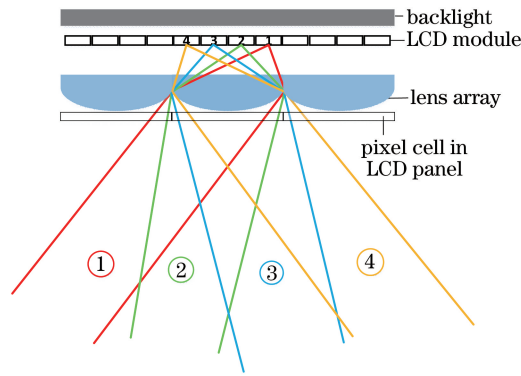


图 1 横向平顶光束定向背光自由立体显示原理图

Fig. 1 Schematic of transverse flattop beam directional backlight for autostereoscopic display

$$\begin{cases} l_1 = \frac{d-a}{d}x + \frac{a}{2}, & \left(0 \leq x \leq \frac{d}{2}\right) \\ l_2 = -\frac{d-a}{d}x + \frac{a}{2}, & \left(-\frac{d}{2} \leq x \leq 0\right) \\ l_3 = \frac{d-a}{d}x - \frac{a}{2}, & \left(-\frac{d}{2} \leq x \leq 0\right) \\ l_4 = -\frac{d-a}{d}x - \frac{a}{2}, & \left(0 \leq x \leq \frac{d}{2}\right) \end{cases} \quad (1)$$

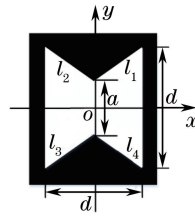


图 2 蝶形液晶开关单元示意图

Fig. 2 Diagram of butterfly liquid crystal switch unit

设显示器背光源为均匀发光的平板,每个波长都有相同的初始相位,并假定蝶形 LCD 开关单元紧贴背光源,则蝶形 LCD 开关单元可看成是一个面光源,其归一化光场分布为

$$u_0(x, y) = \begin{cases} 1, & \left(0 \leq y \leq \frac{d-a}{d}x + \frac{a}{2}, 0 \leq x \leq \frac{d}{2}\right) \\ 1, & \left(0 \leq y \leq -\frac{d-a}{d}x + \frac{a}{2}, -\frac{d}{2} \leq x \leq 0\right) \\ 1, & \left(\frac{d-a}{d}x - \frac{a}{2} \leq y \leq 0, -\frac{d}{2} \leq x \leq 0\right) \\ 1, & \left(-\frac{d-a}{d}x - \frac{a}{2} \leq y \leq 0, 0 \leq x \leq \frac{d}{2}\right) \\ 0, & \text{(others)} \end{cases} \quad (2)$$

### 3.2 蝶形光源经柱透镜后的衍射光场计算模型

定向背光自由立体显示中所用的柱透镜光栅是由多个完全相同的柱透镜组成的片状光学元件<sup>[18]</sup>。柱透镜为平凸柱面透镜,垂直于圆柱轴线的主截面如凸透镜一样,如图 3 所示。在图 3 中, $O$  为柱面曲率中心, $R$  为柱面曲率半径, $n$  为折射率, $d_0$  为柱透镜的最大厚度。

光波在柱透镜中传播时存在光程差,这会改变入射光波的相位,但仅改变相位部分的 1 个方向。通过几何关系得到光波经过柱透镜后产生的光程差  $\Delta l$  为

$$\Delta l = n [d_0 - (R - \sqrt{R^2 - x_t^2})] = n \{d_0 - R [1 - \sqrt{1 - (x_t/R)^2}]\}, \quad (3)$$

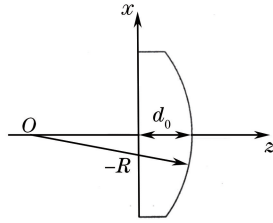


图3 柱透镜垂直于圆柱轴线的主截面示意图

Fig. 3 Diagram of principal section of cylindrical lens perpendicular to cylinder axis

式中  $x_1$  为柱透镜的横向尺寸。由于柱透镜的横向尺寸远小于柱面曲率半径, 即  $x_1 \ll R$ , 因此有:

$$\sqrt{1 - \left(\frac{x_1}{R}\right)^2} = 1 - \frac{x_1^2}{2R^2} - \frac{1}{8} \left(\frac{x_1^2}{R^2}\right)^2 + \dots \approx 1 - \frac{x_1^2}{2R^2}. \quad (4)$$

将(4)式代入(3)式, 并设波数  $k = 2\pi/\lambda$  ( $\lambda$  为入射光波长), 则柱透镜引起的相位差  $\Delta\phi$  为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta l = kn \left( d_0 + \frac{x_1^2}{2R} \right). \quad (5)$$

忽略光波在柱透镜中传播时的能量损耗, 则透过率函数为

$$t_{x,y} = \exp(-iknd_0) \exp\left[ ikx_1^2 / (2R) \right]. \quad (6)$$

忽略相移常量  $\exp(-iknd_0)$ , 将柱透镜焦距  $f = R$  代入(6)式, 可得到简化的柱透镜透过率函数:

$$t_{x,y} = \exp\left[ ikx_1^2 / (2f) \right]. \quad (7)$$

蝶形液晶开关单元、柱透镜和接收面之间的关系如图4所示。光波沿  $z$  方向传播, 物平面为蝶形液晶开关单元平面, 物平面上的点坐标为  $(x_0, y_0)$ , 光场分布为  $u_0(x_0, y_0)$ 。柱透镜放置于物平面前方, 距物平面的距离为  $f$ 。经过柱透镜顶点并垂直于  $z$  轴的空间平面上的点坐标设为  $(x_1, y_1)$ , 距离柱透镜顶点距离为  $z_1$  的接收面上的点坐标设为  $(x_2, y_2)$ 。

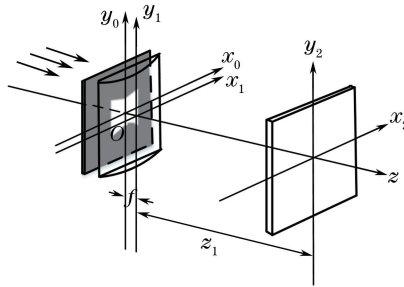


图4 蝶形液晶开关单元、柱透镜和接收面关系示意图

Fig. 4 Diagram of butterfly liquid crystal switch unit, cylindrical lens, and viewing screen

设入射光波长为  $\lambda$ , 根据衍射积分理论和柱透镜的透过率函数公式, 可得通过柱透镜后  $x_1Oy_1$  平面上的光场为

$$u_1(x_1, y_1) = \frac{\exp(-ikf)}{i\lambda f} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} u_0(x_0, y_0) \exp\left\{ \frac{-ik}{2f} [(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2] \right\} \exp\left( ik \frac{x_1^2}{2f} \right) dx_0 dy_0. \quad (8)$$

根据惠更斯-菲涅耳衍射公式, 接收面  $x_2Oy_2$  上的光场分布为

$$u_2(x_2, y_2) = \frac{\exp(-ikz_1)}{i\lambda z_1} \int u_1(x_1, y_1) \exp\left[ \frac{-ik}{2z_1} (x_2 - x_1)^2 \right] dx_1, \quad (9)$$

式中  $y_1 = y_2$ 。由(2)式、(8)式和(9)式, 并忽略相移常量  $-\frac{\exp(-ikf)\exp(-ikz_1)}{\lambda^2 f z_1}$ , 最终可得距离柱透镜顶点为  $z_1$  的接收面上的光场分布为 4 部分光场的叠加, 即

$$\begin{cases} u_{21}(x_2, y_2) = \int_0^{d/2} \int_0^{(d-a)x_0/d+a/2} \int_{-t/2}^{t/2} U(x_0, y_0, x_1, y_1, x_2, y_2) dx_1 dy_0 dx_0 \\ u_{22}(x_2, y_2) = \int_{-d/2}^0 \int_0^{-(d-a)x_0/d+a/2} \int_{-t/2}^{t/2} U(x_0, y_0, x_1, y_1, x_2, y_2) dx_1 dy_0 dx_0 \\ u_{23}(x_2, y_2) = \int_{-d/2}^0 \int_{(d-a)x_0/d-a/2}^0 \int_{-t/2}^{t/2} U(x_0, y_0, x_1, y_1, x_2, y_2) dx_1 dy_0 dx_0 \\ u_{24}(x_2, y_2) = \int_0^{d/2} \int_{-(d-a)x_0/d-a/2}^0 \int_{-t/2}^{t/2} U(x_0, y_0, x_1, y_1, x_2, y_2) dx_1 dy_0 dx_0 \end{cases}, \quad (10)$$

式中  $t$  为柱透镜光栅阵列的单元宽度。  $U(x_0, y_0, x_1, y_1, x_2, y_2) = \exp\left\{-\frac{ik}{2f}[(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2]\right\} \cdot \exp\left[\frac{ik}{2f}x_1^2\right] \cdot \exp\left\{-\frac{ik}{2z_1}[(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2]\right\}$ , 则叠加后的总光场为

$$u_2(x_2, y_2) = u_{21}(x_2, y_2) + u_{22}(x_2, y_2) + u_{23}(x_2, y_2) + u_{24}(x_2, y_2). \quad (11)$$

## 4 数值计算与结果分析

### 4.1 初始参数与仿真结果

利用软件 MathCAD 及 MATLAB 对蝶形单元结构光源经过柱透镜后的截面光强进行模拟, 以 55 inch (139.7 cm) 4K 电视屏为例, 根据文献[19]得到的参数进行数值仿真。数值计算的初始参数如下: 波长  $\lambda = 555$  nm (人眼明视觉函数峰值波长), 柱透镜宽度 (节距)  $t = 0.3044$  mm, 蝶形 LCD 开关单元的宽度  $d = 0.05$  mm, 蝶形参数  $\beta = 0.6$ 。将蝶形液晶开关单元置于柱透镜的物方焦平面上, 根据 (11) 式并利用 MATLAB 编程模拟传输距离  $z_1 = 6000$  mm 时, 焦距不同的柱透镜出射光场的横向归一化能量分布曲线, 结果如图 5 所示。由图 5 可知: 柱透镜的焦距  $f$  对横向能量分布的影响较大; 当  $f \leq 4$  mm 和  $f \geq 12$  mm 时, 能量分布曲线失去平顶特性; 当  $f = 8$  mm 时, 能量分布曲线具有较大的平顶宽度和较小的平顶能量波动。  $f$  对输出横向能量分布的影响主要来自光源尺寸 (蝶形宽度)  $d$  与  $f$  的比值。当相对尺寸  $d/f$  较大时,

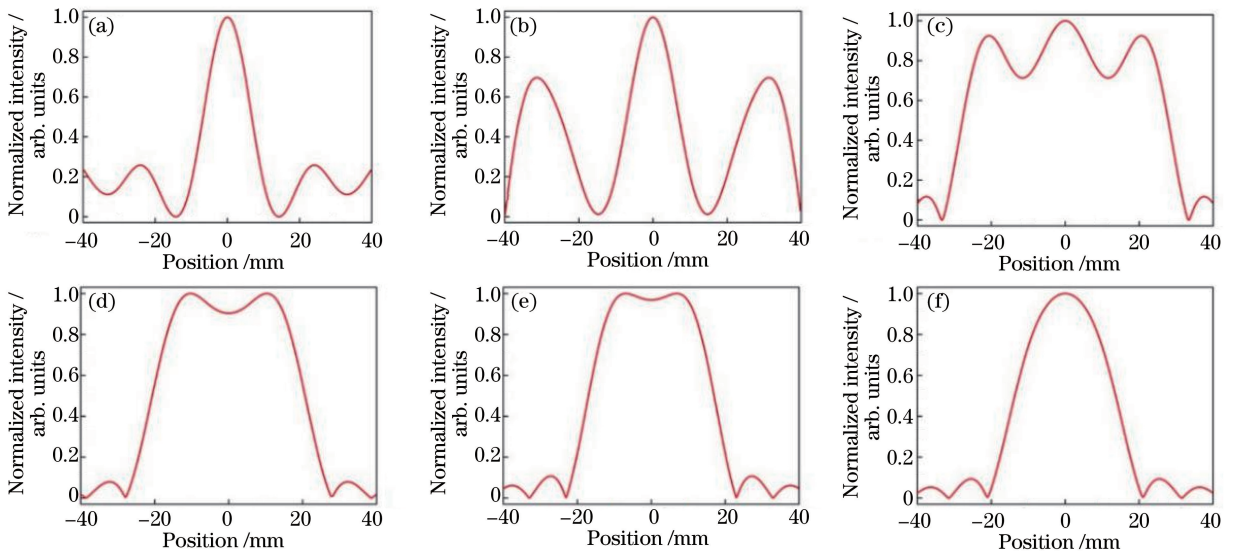


图 5 传输距离  $z_1 = 6000$  mm 时光束横向归一化能量分布随焦距  $f$  的变化。

(a)  $f = 2$  mm; (b)  $f = 4$  mm; (c)  $f = 6$  mm; (d)  $f = 8$  mm; (e)  $f = 10$  mm; (f)  $f = 12$  mm

Fig. 5 Transverse normalized energy distribution of beam versus focal distance  $f$  with transmission distance  $z_1$  of 6000 mm. (a)  $f = 2$  mm; (b)  $f = 4$  mm; (c)  $f = 6$  mm; (d)  $f = 8$  mm; (e)  $f = 10$  mm; (f)  $f = 12$  mm

光源呈现为面光源,柱透镜输出的光束是发散光束,能量无法呈平顶分布;当  $d/f \ll 1$  时,光源呈现为点光源,柱透镜输出的光束是平行光束,能量分布近似呈高斯分布。只有当相对尺寸  $d/f$  介于上述两种情况之间时,蝶形光源的平顶效应才能出现。

上述初始参数不变,取柱透镜焦距  $f$  为 8 mm,得到不同传输距离的横向光场归一化能量分布曲线,如图 6 所示。由图 6 可知,平顶部分光能量的波动幅度基本一样,说明蝶形液晶开关单元配合适当焦距的柱透镜,可以在 2000~8000 mm 传输距离范围内得到具有横向平顶特性的光束,横向平顶光束的宽度随着传输距离的增大而增大。

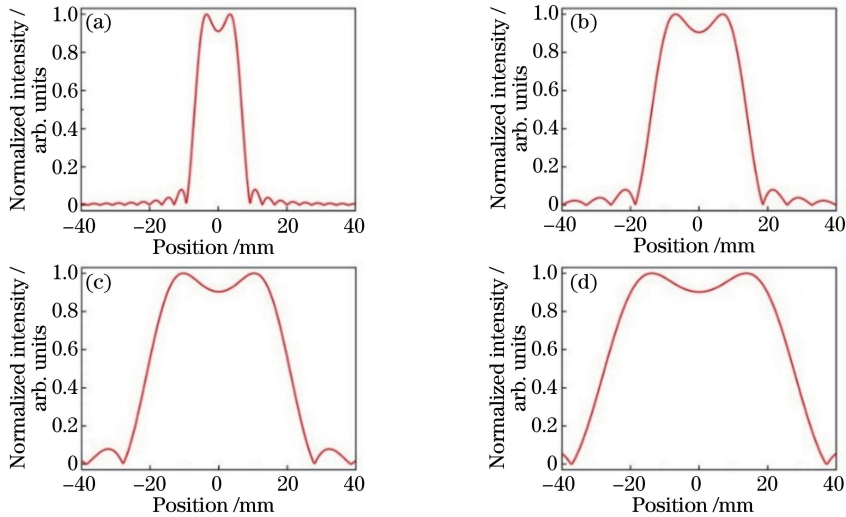


图 6 焦距  $f=8$  mm 时光束横向归一化能量分布随传输距离  $z_1$  的变化。

(a)  $z_1=2000$  mm; (b)  $z_1=4000$  mm; (c)  $z_1=6000$  mm; (d)  $z_1=8000$  mm

Fig. 6 Transverse normalized energy distribution of beam versus transmission distance  $z_1$  with focal distance  $f$  of 8 mm. (a)  $z_1=2000$  mm; (b)  $z_1=4000$  mm; (c)  $z_1=6000$  mm; (d)  $z_1=8000$  mm

#### 4.2 蝶形参数 $\beta$ 的影响

取柱透镜焦距  $f=8$  mm,改变蝶形参数  $\beta$ ,其余初始参数不变,得到横向光场归一化能量分布曲线,如图 7 所示。 $\beta=1$  时,正方形 LCD 开关单元的能量分布曲线为钟形分布曲线,如图 7(a)所示; $\beta=0.8$  时,能量分布曲线的中心部位已开始变得平坦,如图 7(b)所示;随着  $\beta$  继续减小,曲线中心的形状由凸起变为凹陷,

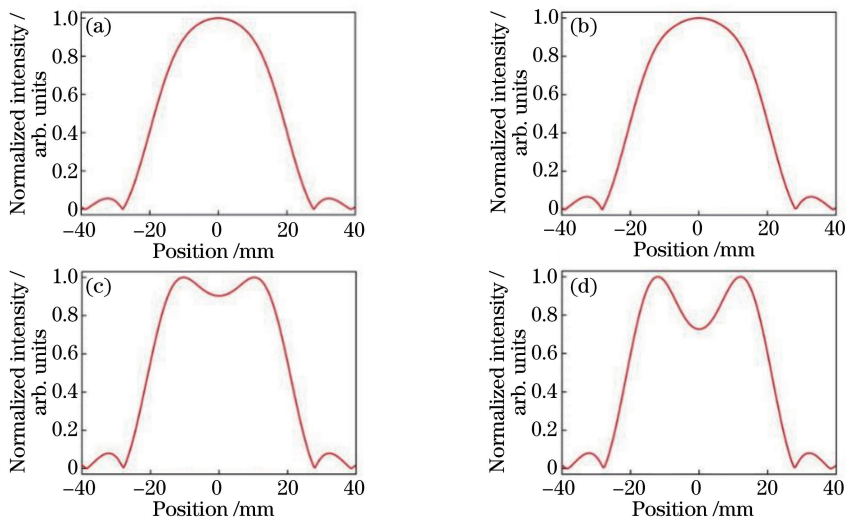


图 7 焦距  $f=8$  mm 时光束横向光场归一化能量分布随蝶形参数  $\beta$  的变化。(a)  $\beta=1$ ; (b)  $\beta=0.8$ ; (c)  $\beta=0.6$ ; (d)  $\beta=0.4$

Fig. 7 Transverse normalized energy distribution of beam versus butterfly parameter  $\beta$  with focal distance  $f$  of 8 mm.

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

如图 7(c)所示;随着  $\beta$  继续减小,曲线凹陷得更加明显,如图 7(d)所示。根据这个变化规律可知,当  $\beta$  为 0.6~0.8 时,可以找到一个  $\beta$  值使横向光场归一化能量分布曲线的平顶部分是平坦的,即曲线的中心部位既不凸起也不凹陷。图 7 说明, $\beta$  的取值对横向平顶光束的质量影响较大。 $\beta$  对柱透镜输出横向光场能量分布的影响主要来自蝶形光源纵向衍射的叠加。由于柱透镜在纵向上对光束的变换与自由空间菲涅耳衍射相同,因此蝶形光源在纵向上的中心高度小于两边的高度,纵向衍射光场中心的能量小于两边的能量,故可得到横向光场中心凹陷的结果,光源中心凹陷得越明显(即  $\beta$  越小),横向光场中心凹陷得也就越明显。

### 4.3 能量均匀度分析

为了定量评价蝶形光源经柱透镜整形后得到的横向平顶光束的质量,引入半峰值全宽度的能量均匀度  $\gamma$ <sup>[20]</sup>:

$$\gamma = \left[ 1 - \frac{\sqrt{\sum (I_m - \bar{I})^2 / N_1}}{\bar{I}} \right] \times 100\%, \quad (12)$$

式中  $I_m$  ( $m=1, 2, 3, \dots, N$ ) 为每个横向采样点的能量值,  $\bar{I}$  为各采样点能量的平均值,  $N_1$  为采样点个数。

对图 5~7 中的光强数据进行采样分析整理,取采样点个数  $N$  为 650。由于模拟仿真计算量很大,图 5 中的柱透镜焦距  $f$ 、图 6 中的光束传输距离  $z_1$  和图 7 中蝶形参数  $\beta$  的取值个数均有限,因此通过二次曲线拟合得到能量均匀度  $\gamma$  随柱透镜焦距  $f$ 、光束传输距离  $z_1$  和蝶形参数  $\beta$  的关系曲线,如图 8 所示。由图 8 可知:随着  $f$  由 2 mm 增大到 12 mm,  $\gamma$  存在一个最大值,最大值位置在  $f=8$  mm 处,  $\gamma$  的最大值为 86.3%;随着  $\beta$  由 0.4 增大到 1.0,  $\gamma$  也存在一个最大值,最大值位置在  $\beta=0.6$  处,  $\gamma$  的最大值为 86.3%;随  $z_1$  由 2000 mm 增大到 8000 mm,  $\gamma$  值基本不变,这说明当柱透镜输出的光束为平顶光束时,  $\gamma$  随  $z_1$  的变化很小,符合裸眼三维显示在不同距离观看的要求。作为参考亮度值,图 8 中还给出了半峰值全宽度的归一化能量平均值  $\bar{I}$ , 其值随  $f$ 、 $z_1$ 、 $\beta$  的变化趋势与  $\gamma$  随  $f$ 、 $z_1$ 、 $\beta$  的变化趋势一致,  $\gamma$  最大值对应的  $\bar{I}$  约为 0.89。

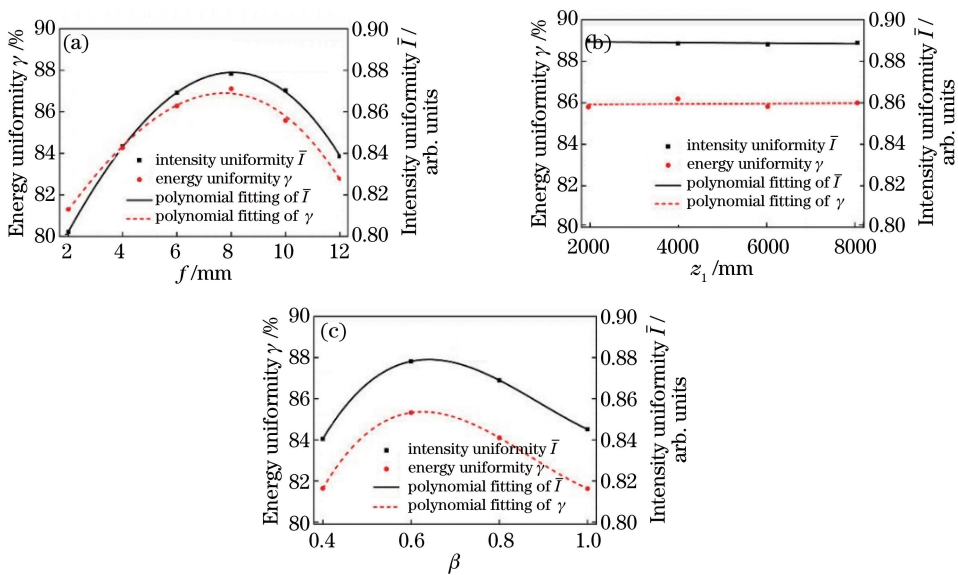


图 8 能量均匀度  $\gamma$  和归一化能量平均值  $\bar{I}$  随 (a) 柱透镜焦距  $f$ 、(b) 光束传输距离  $z_1$  和 (c) 蝶形参数  $\beta$  的变化

Fig. 8 Variations of energy uniformity  $\gamma$  and intensity uniformity  $\bar{I}$  with (a) focal length  $f$  of cylindrical lens, (b) transmission distance  $z_1$  of beam, and (c) butterfly parameter  $\beta$

## 5 结 论

将定向背光自由立体显示系统中的 LCD 开关单元设计成蝶形形状,以 55 inch(139.7 cm)4K 电视屏的定向背光模块结构参数为基本参数,研究了放置于柱透镜物方焦平面上的蝶形 LCD 开关单元作为光源发出的光束通过柱透镜后的横向衍射光场分布。数值计算结果表明:当蝶形 LCD 开关单元的宽度  $d$  为 0.05 mm

时,焦距  $f$  为 4~12 mm 的柱透镜输出的光束具有横向平顶特性;当  $f \approx 8$  mm 时,横向衍射光场的能量均匀度  $\gamma$  最好,并且在可视距离 2000~8000 mm 范围内基本保持不变;蝶形参数  $\beta$  对横向衍射光场的  $\gamma$  影响较大, $\beta$  越小,横向衍射光场的中心光强越小,随着  $\beta$  减小,横向衍射光场的  $\gamma$  先增大后减小,存在一个可使  $\gamma$  达到最大值的  $\beta$  值; $\gamma$  最大值约为 86.3%,对应的归一化能量平均值  $\bar{I}$  约为 0.89。

### 参 考 文 献

- [1] Zhao Wuxiang, Wang Qionghua, Li Lei. Tunable cylindrical liquid lens array for 2D/3D switchable display[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0823001.  
赵悟翔, 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): 0823001.
- [2] Li Jing, Wang Ani, 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.
- [3] Algorri J F, Urruchi V, García-Cámara B, *et al.* Liquid crystal microlenses for autostereoscopic displays[J]. Materials, 2016, 9(1): 36.
- [4] 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.
- [5] Fattal D, Peng Z, Tran T, *et al.* A multi-directional backlight for a wide-angle, glasses-free three-dimensional display[J]. Nature, 2013, 495(7441): 348-351.
- [6] Feng J L, Wang Y J, Liu S Y, *et al.* Three-dimensional display with directional beam splitter array[J]. Optics Express, 2017, 25(2): 1564-1572.
- [7] Zhuang Z F, Zhang L, Surman P, *et al.* Directional view method for a time-sequential autostereoscopic display with full resolution[J]. Applied Optics, 2016, 55(28): 7847-7854.
- [8] 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.
- [9] Fan H, Zhou Y G, Liang H W, *et al.* Glasses-free 3D display with glasses-assisted quality: key innovations for smart directional backlight autostereoscopy[C]. Visual Communications and Image Processing, 2015: 15938561.
- [10] Li K Y, Fan H, Wang J H, *et al.* Visual effect of a linear Fresnel lens illuminated with a directional backlight[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2016, 33(6): 1155-1159.
- [11] 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.
- [12] Liou J C, Yang C F, Chen F H. Dynamic LED backlight 2D/3D switchable autostereoscopic multi-view display[J]. Journal of Display Technology, 2014, 10(8): 629-634.
- [13] Chen Kai. The research and design of the system that converting a Gaussian to a flattop beam[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011.  
陈凯. 高斯光束整形为平顶光束整形系统的研究与设计[D]. 北京: 北京工业大学, 2011.
- [14] He Yi. Human retina motions measurement with high speed line scanning confocal fundus imaging system[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.  
何益. 高速线扫描共焦眼底成像技术及其在人眼视网膜抖动检测中的应用研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [15] Gao K, Xu L X, Zheng R, *et al.* Flat-top laser beam generated by coherent beam combining of Gaussian lasers[J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(1): 45-47.
- [16] Zhao Baoyin, Lü Baida. A new synthesis method for synthesizing on-axis flat-topped beams by using a defocusing telescope system[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(5): 2919-2924.  
赵保银, 吕百达. 使用离焦望远镜系统集成轴上平顶光束的一种新方法[J]. 物理学报, 2008, 57(5): 2919-2924.
- [17] 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.



- [18] Wen Yuling, Lan Xujun, Yang Hu, *et al.* The phase transformation function of cylindrical lens[J]. Journal of Shanxi Normal University (Natural Science Edition), 2013, 27(2): 34-38.  
温玉玲, 兰旭君, 杨虎, 等. 柱透镜的位相变换作用[J]. 山西师范大学学报(自然科学版), 2013, 27(2): 34-38.
- [19] Chen Fangping, Zhang Xiaoting, Liu Chujia, *et al.* Design on the directional backlight of crosstalk eliminated autostereoscopic display[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(5): 0522004.  
陈芳萍, 张晓婷, 刘楚嘉, 等. 消除自由立体显示串扰的定向背光源设计[J]. 光子学报, 2017, 46(5): 0522004.
- [20] Wu Zhong. Study on the propagation characteristics of the flattened Gaussian beam and the beam shaping[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2012.  
吴忠. 平顶高斯光束的传输特性及其整形方法的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2012.