

文章编号:1007-2780(2017)05-0394-08

光栅式自由立体显示器空间视区建模 与串扰计算

李 晶^{1,2,3*}, 李建军^{1,2,3}

- (1. 特种显示国家工程实验室, 上海 201114;
2. 现代显示技术国家重点实验室, 上海 201114;
3. 中航华东光电(上海)有限公司, 上海 201114)

摘要:为了实现光栅式自由立体显示器的空间视区建模与串扰的理论计算,提出一种基于光学仿真软件 Lighttools 的空间视区模型建立与串扰计算方法。首先,在 Lighttools 中,以设计最佳观看位置(OVD)为轴心,建立 3 个空间平面探测器。然后,对探测平面上的照度仿真数据进行特征分析,得到空间视区的简化模型;分析简化模型与原始模型的空间线性和空间角度关系,得到空间视区在三维空间的几何分布。最后,依据视区模型的理论边界,计算各个视区范围内的串扰度。从而完成了视区与串扰两个参数的规范化与数字化,为自由立体显示器的设计和使用提供明确的理论指导。

关 键 词:自由立体显示器;视区;串扰;Lighttools;照度;空间模型

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20173205.0394

Modeling and crosstalk calculation methods of spatial viewing zones for the autostereoscopic display device based on parallax barrier or lenticular lens

LI Jing^{1,2,3*}, LI Jian-jun^{1,2,3}

- (1. National Engineering Laboratory for Special Display, Shanghai 201114, China;
2. State Key Laboratory of Modern Display, Shanghai 201114, China;
3. AvicHuaDong Photoelectric CO., Ltd, Shanghai 201114, China)

Abstract: In order to establish the modeling of spatial viewing zones and implement theoretical calculation of crosstalk for the Autostereoscopic Display Device, this paper proposes the modeling of spatial viewing zones and crosstalk calculation method that are based on a optical simulation software named Lighttools. First of all, in the Lighttools, three spatial plane detectors have been established by regarding the original viewing distance(OVD) as the centrolaxis. In addition, the simplified modeling of spatial viewing zones is established by analyzing the stimulation data of detector planes. Furthermore, this paper analyzes the spatial linearity relation and angle relations between simplified modeling and

收稿日期:2016-11-17;修订日期:2016-12-26.

* 通信联系人, E-mail:lijing_opt@126.com

original modeling so that a geometric distribution of spatial viewing zones in three dimensions is achieved. Finally, according to the theoretical boundaries of spatial viewing zones model, the crosstalk degrees of each visual area are evaluated. The standardization and digitization of the two vital parameters, which are spatial viewing zones and crosstalk specifically, provide an objectively theoretical guidance to the design and application of the Autostereoscopic Display Device.

Key words: autostereoscopic display device; spatial viewing zones; crosstalk; Lighttools; illumination; space model

1 引言

当今,各种显示技术对人眼的感官要求的满足程度日益增强,裸眼立体显示技术解决了观察者佩戴辅助设备(如头盔、眼镜等)的不适和眩晕感等问题,被认为是具有生命力的下一代信息显示技术。光栅式自由立体显示器(包含狭缝式和柱镜式)在裸眼立体显示技术中占有重要地位,且可在现有 2D 显示器上直接贴合定制光栅,实现工艺相对简单,从而备受青睐^[1-2]。

可视区与串扰度作为光栅式自由立体显示器 3D 入眼效果的重要评价指标,本应作为一项设计需求被合理提出,并在光栅参数设计时就被设计达标,但由于仿真分析方法的不完善或不统一,现在一般由最终成型产品的实验测量数据确定,只能作为参考^[3-4]。没有相应的理论模型作为支撑,不能对产品的设计、加工、安装过程起到指导和约束限制的作用,也不能对产品各阶段的观察空间范围内的 3D 显示效果有明确的宏观印象^[5-8]。本文介绍一种基于光学仿真软件 Lighttools 的光栅裸眼 3D 显示器可视区与串扰的空间模型量化描述方法,便于解决上述问题。

2 Lighttools 简化模型建立

2.1 模型简化方式

依据裸眼立体显示器的设计需求、光栅类型选择以及光栅参数计算公式,得到关键参数如:显示器尺寸、分辨率、子像素尺寸,最佳观看距离、眼瞳距、视点数、光栅材料折射率,放置距离、光栅周期、缝宽比(狭缝光栅)、半径(柱镜光栅)、拱高(柱镜光栅)、倾斜角度($0\sim 90^\circ$)等。

考虑数据量的庞大,为了简化后续的仿真分

析,首先把光栅的倾角简化为 0° ,然后按照视差图像进入左右眼的标号分成两类,分两次加载到两个仿真模型。当只加载左眼图像在显示器光源位置时,相当于左眼视差图像全亮,右眼视差图像全暗,当只加载右眼视差图像在显示器光源位置时,相当于右眼视差图像全亮,左眼视差图像全暗;综合两种探测数据,即为左右视图全亮的正常显示情况。

2.2 坐标系与探测器设置

以显示器显示前表面对称中心为坐标系中心(0,0,0),观察者所在方向为 $+z$ 方向,建立遵循右手系坐标系,如图1。再以最佳观看距离(0,0,OVD)为轴心位置建立大小合适的3个平面探测器,分别为平面 zy 内竖直探测器 receiver1、平面 xz 内的水平探测器 receiver2、平面 xy 内的平行探测器 receiver3。综合系统分析时间、运行软硬件环境等相关因素在3个探测器的照度计上划分大小一致的网格,加载一定数量的仿真光线,得到相应简化模型的照度仿真数据。

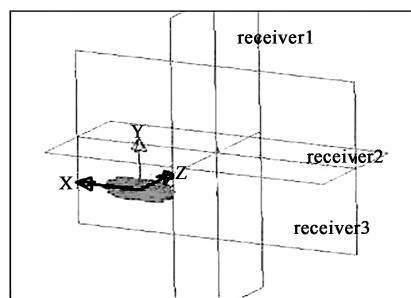


图1 坐标系与探测器设置图

Fig.1 Coordinate system and detector set

例如一组前置狭缝光栅 19 in (1 in = 2.54 cm)裸眼立体显示器(以下简称例1)和一组4个50 in 拼接屏柱镜光栅裸眼立体显示器(以下简称例2)的设计参数^[9]和探测器设置参数如表1。

表 1 两种光栅显示器的设计参数与探测器设置
Tab.1 Parameter design and detector setup for two kinds of Grating display

参数项	狭缝光栅	柱镜光栅
放置距离	1.7511 mm	30.8539 mm
光栅周期	0.3769 mm	2.2819 mm
缝宽比	1/3	---
折射率	---	1.5
柱面半径	---	15.426 9 mm
柱面拱高	---	0.0423 mm
倾斜角度	0~90°	0~90°
光栅参数	receiver1	YZ:5 m×1 m YZ:18 m×8 m
	receiver2	XZ:5 m×1 m XZ:13 m×6 m
	receiver3	XY:5 m×5 m XY:13 m×10 m

注【1】:光栅参数依据参考文献[9]中方法计算。

其中 19 in 狭缝光栅裸眼立体显示器的探测器网格精度统一设置为 5 mm×5 mm,4 个 50 in 拼接屏柱镜光栅裸眼立体显示器的网格精度统一设置为 50 mm×50 mm。

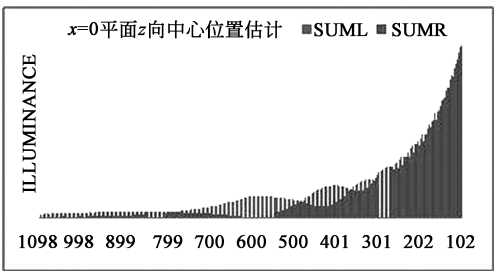
3 空间视区与串扰理论模型建立

3.1 receiver1 上的数据分析

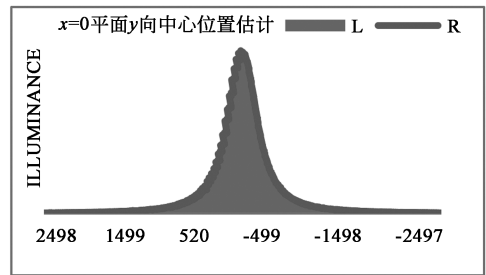
3.1.1 空间中心位置确定

在 receiver1 探测平面上,记录的是某中间可视子区间在该位置的切向平面信息。分别对该探测器上各 z 向位置和各 y 向位置的全副坐标范围内的 y 点能量和 z 点能量数据求和,找到特征数据位置,记为该切向平面的 z 向和 y 向的中心,因可视子区间的空间对称性,该切面的 z 向和 y 向的中心即为整个空间模型的 z 向和 y 向的中心。

如本例 1 中,该探测器上 z 向各个坐标位置在 $y \in (-2\ 500, 2\ 500)$ mm 范围内的左右图能量对比示意图如图 2(a)所示, y 向各个坐标位置在 $z \in (100, 1\ 100)$ mm 范围内的左右图能量对比示意图如图 2(b)所示,分别以能量比(sumL/sumR)最大位置和能量峰值位置为特征位置,得到本例视区模型的空间中心位置为 $(x, 0, 600)$ mm,与设计值相符。



(a)各 z 坐标位置 y 向能量和对比
(a)Sum of all y energy at every z positions



(b)各 y 坐标位置 z 向能量和对比
(b)Sum of all z energy at every y positions

图 2 Receiver1 上左右视图能量和对比

Fig.2 Contrast the sum of the energy of the left and right viewsonreceiver1

3.1.2 可视区 z 向长度范围确定

在 receiver1 探测平面的 $y=Y'o$ 直线上,左右图能量对比特征位置,此处取与 OVD 距离最近的两个比值为 1 处,计为可视区 z 向长度范围($Z'min, Z'max$)。当比值为 1 时,左右图能量相当;越靠近 $Z'o$ 位置,串扰程度越小,特别地在 $Z'o$ 位置,基本没有串扰。如本例 2 中,在 $y=Y'o$ 直线 $z \in (3\ 000, 10\ 000)$ mm 范围内, z 向各个位置的左右图能量对比示意图如图 3,由比值为 1 处确定的可视区长度范围(6 056, 8 540)mm。

当然,视区是对视差图像 3D 显示效果比较好的观看区间的描述,此处作为判定视区端点的特征位置也可根据实际情况作相应的调整,当选择比值小于 1 的某个特征位置时,对应视区内的串扰程度相应降低,视区的空间长度值也相应减小。

3.2 receiver2 上的数据分析

在 receiver2 探测平面上,记录的是可视区间在观察空间水平面上的投影轮廓信息,包括可视子区间个数、轮廓形状和位置等。

假设在显示器子像素单元上规律排列的左右图在空间的成像视区相间连续,且在水平面内的

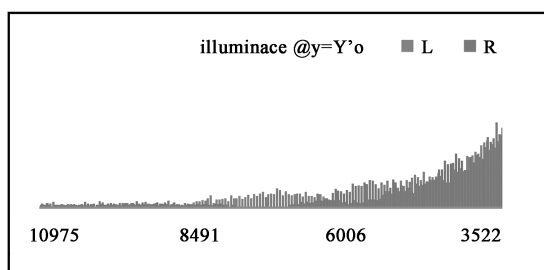


图3 y 向中心线上各 z 坐标位置左右图能量对比
Fig.3 Energy contrast between the left and right of views at each z position in the y center line

投影轮廓为菱形。定义区间宽度为该平面上的直线 $z=Z'$ 截得的菱形区的宽度;定义峰值位置为在该平面 $z=Z'$ 直线上,各可视子区间的 x 向能量包络中心。则在 $z=Z'o$ 处菱形区连续,区间宽度最大,峰值间距等于区间宽度。当 $z \in (Z'min, Z'o)$ 时,为菱形区的下三角区,随着 z 值减小,即越靠近显示器方向,菱形区区间宽度逐渐减小,峰值间距也逐渐减小;当 $z=Z'min$ 时,峰值间距最小,区间宽度为零。当 $z \in (Z'o, Z'max)$ 时,为菱形区的上三角区,随着 z 值的增大,即越远离显示器的方向,菱形区区间宽度逐渐减小,峰值间距逐渐增大;当 $z=Z'max$ 时,峰值间距最大,区间宽度为零。如图4为水平面内可视菱形区投影轮廓模型示意图。

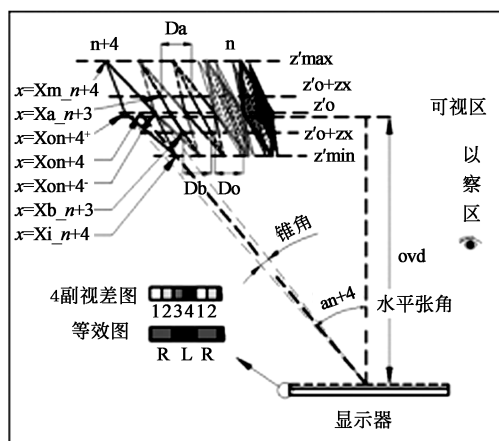


图4 水平面内可视菱形区投影轮廓模型

Fig.4 Projection contour model of visible diamond area in horizontal plane

3.2.1 可视子区间个数确定

在 receiver2 探测平面的 $z=Z'o$ 直线上,各个 x 坐标位置的左右视差图成像的连续能量包

络个数即为有效视区的个数,记为 N 个。由于从空间中心位置到水平张角越来越大的左右两边,串扰程度逐渐增加以及能量逐渐衰减,所以 3D 入眼效果比较好的视区的个数有限。选取合适的特征参数,如左右图在该直线位置的能量均值,滤掉分布在观测区间左右两侧的高串扰、低能量视区,得到合适的可视子区间的个数。如本例2中, $@z=Z'o$ 直线, $x \in (-6500, 6500)$ mm 范围内各 x 坐标位置的左右视图照度对比数据如图5所示,与两者均值比较后,获得左右视图连续有效的照度区间个数为 $N=28$ 个。

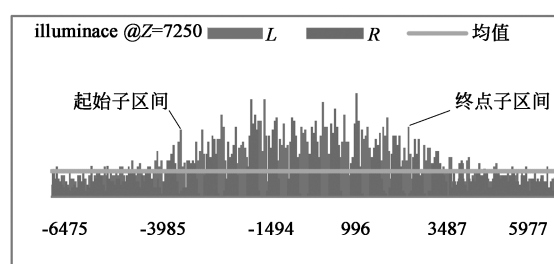


图5 水平面 z 向中心线上各 x 坐标左右图照度数据对比(柱镜)

Fig.5 Energy contrast between the left and right of views at each x position in the z center line on receiver2(cylindrical)

3.2.2 水平面内剖面轮廓模型建立

在确定可视子区间个数后,对其照度数据进行峰值位置的拟合估计,如图6。并依据公式(1)计算出可视区在水平面 $z=Z'o$ 直线上的峰值间距 Do 。

$$Do = \frac{Xo_{max} - Xo_{min}}{N - 1}, \quad (1)$$

其中: Xo_{max} 与 Xo_{min} 分别为依据照度数据拟合的终点和起始子区间的中心峰值坐标, N 为被纳入计数的可视子区间的个数。

各个可视子区间在该平面 $z=Z'o$ 直线上的

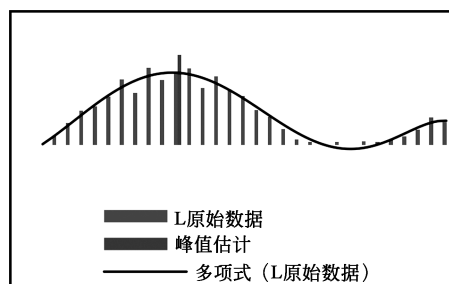


图6 子区间峰值估计

Fig.6 Energy peak position estimation

峰值位置坐标 Xo_n 由公式(2)得出。各个菱形区在该平面 $z=Z'o$ 直线上的边界点坐标可依次由公式(3)、(4)给出。

$$Xo_n = Xo_{\min} + (n-1) \times Do, \quad (2)$$

$$Xo_{n+} = Xo_n + \frac{Do}{2}, \quad (3)$$

$$Xo_{n-} = Xo_n - \frac{Do}{2}, \quad (4)$$

其中, $n=1, 2 \cdots N$ 。

依据菱形区的几何特征,只要再确定当 $z=Z'\min$ 和 $z=Z'\max$ 时,各可视区的峰值水平坐标即可完成可视菱形区水平面的轮廓模型建立。又当 $z=Z'\min$ 和 $z=Z'\max$ 时,串扰程度在视区长度范围内最大,判定的中心峰值位置误差最大。所以,在视区空间模型的长度中心线 $z=Z'o$ 两侧,选取两个合适的位置如 $z=Z'o+Zx$ 、 $z=Z'o-Zx$,按照上述方法分别计算两条 z 向直线位置上的 N 个峰值位置 Xb_n 、和 Xa_n ,进而根据空间模型的线性关系,相对精确的计算出 $z=Z'\min$ 和 $z=Z'\max$ 时可视区的各个水平峰值坐标 Xi_n 、和 Xm_n 如公式(5)(6),其中 $Z'o+Zx \in (Z'\min, Z'\max)$ 、 $Z'o-Zx \in (Z'\min, Z'\max)$, $n \in (1, N)$ 。

$$X_{m_n} = \frac{(Z'_{\max} - Z'o) \times (X_{a_n} - Xo_n) + Zx \times Xo_n}{Zx}, \quad (5)$$

$$X_{i_n} = \frac{(Z'_{\min} - Z'o) \times (X_{b_n} - Xo_n) + Zx \times Xo_n}{Zx}, \quad (6)$$

此时可根据菱形区的 4 个边界特征点 Xo_{n+} 、 Xo_{n-} 、 Xm_n 、 Xi_n 恢复其在水平内的剖面轮廓;如图 7 为本例 2 水平面内仿真光线分布与其视区轮廓数据恢复模型对比。

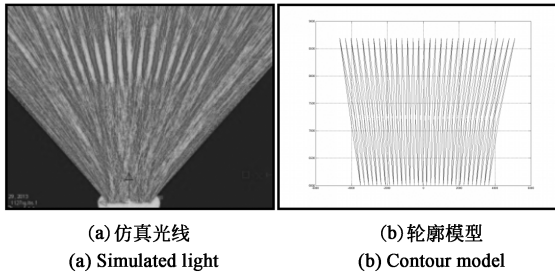


图 7 水平面仿真光线分布与可视区轮廓模型对比

Fig.7 Comparison of the light distribution and the contour model on horizontal plane

3.3 receiver3 上的数据分析

在与显示器平行放置的 receiver3 探测平面上,记录的是各个可视子区间在设计观察位置的高度轮廓信息。由光的直线传播特性可知,根据可视子区间在该平面上的投影高度所确定的俯仰角度可推算空间长度方向上各位置处的可视区间高度信息。如图 8 为例 1 和例 2 在各自仿真模型的 receiver3 探测面上的仿真光线分布示意图,两种光栅立体显示器呈现不同的高度轮廓分布态势,所以分开讨论两种光栅显示器的可视区间高度估计方法。

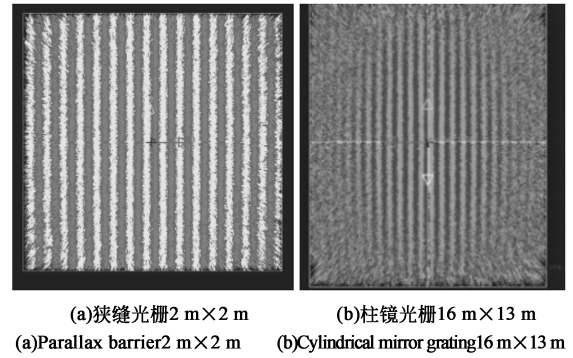


图 8 两种光栅显示器平行面光线仿真

Fig.8 Simulation of light distribution on parallel surface for two kinds of grating display

3.3.1 狭缝光栅成像视区的高度估计

因为狭缝光栅的色散分光特性良好,所以在空间很大高度范围内以几种不同颜色表征的视差图像的成像光线在各自视区上延伸,来自其他视差图像的杂散光相对来说都不明显。考虑随着高度的增加,能量的衰减特性明显,所以假设各个可视子区间在与显示器前表面平行的 $z=OVD$ 平面上的投影轮廓为高度相等的矩形,选择合适的位置作为可视高度范围的最佳边界,依据此高度确定的俯仰角度为整个可视区间在空间长度方向上的俯仰角度。

如图 9 为例 1 中几个高度位置上各 x 坐标能量对比示意图,当高度上升为 1 000 mm 时,中心子视区的中心峰值能量与 $y=0$ mm 位置的边缘可视子区间的中心峰值能量相等。依据此方式确定的该立体显示器的可视高度范围为 $(-1\ 000, 1\ 000)\text{mm}@z=600\text{ mm}$ 。

当然也可根据 2D 显示器的最佳俯仰观测角

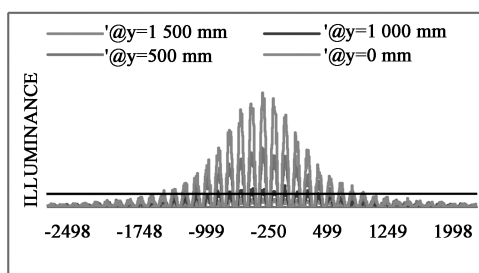


图9 各个 x 坐标位置几个高度线上的能量对比
Fig.9 Energy contrast of several height lines in each x coordinate position

度、应用场景光的干扰、应用环境的人机功效等因素确定狭缝式裸眼立体显示器的可视区的高度范围与最佳俯仰角度。

3.3.2 柱镜光栅成像视区的高度估计

假设柱镜光栅裸眼立体显示器的可视子区间在 receiver3 探测平面上的投影轮廓为高度不等的矩形,则各视区中心峰值位置 $x = X_{o_n}$ 的高度线上主副视图能量对比特征位置即可确定为可视子区间在 receiver3 探测平面上的高度。特征位置此处取比值为 1 处,即主副视图能量相当的位置,在此高度空间内,主视图的能量高于副视图的能量,特别地,在水平位置,主视图的能量最大,副视图的能量最小,串扰最小;此高度以外的视空间主副视图的能量杂散严重,所以不计入可视子区间的高度范围以内。

当然也可根据能够接纳的串扰程度,选取主副视图的能量对比特征值位置,此时,计算出的可视子区间的高度范围相应减小或者增大。如图 10,为本例 2 中某个可视子区间中心峰值位置处全幅 y 坐标范围内的主副视图的能量对比示意图。分别对两个交点子区间进行拟合估计,确定该视区的高度。

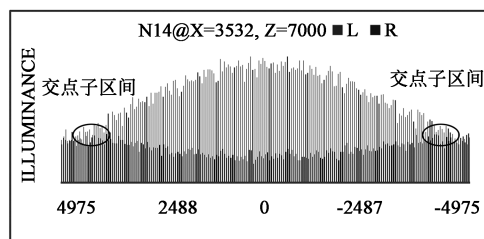


图 10 中心峰值高度线上左右图能量对比(柱镜)
Fig.10 Energy contrast of the left and right views on the peak position height (cylindrical)

3.4 串扰度

3.4.1 简化模型串扰度计算

各个可视子区间内来自其他视差图像的串扰亮度对主视图的亮度的影响程度被定义为串扰度,如公式(7)。由于仿真模型把规律排布的多幅视差图像简化成相间排布的左右视图放置在显示器子像素单元上,则左右视图互为主副视图;依据各个可视子区间在水平面和平行面内的剖面轮廓,可以方便的统计两个探测平面上各个可视子区间轮廓内各位置上的主视图能量与副视图能量,对于在显示器的子像素级位置上相间排图的左右光源,在相同统计位置的亮度比和照度比可以相互转化,从而得到各个位置的串扰度。

如图 11(a),为本例 1 中水平探测器上某个中央可视子区间内各个位置上的主副视图能量对比示意图,在视区中央位置,几乎没有串扰,而在视区边缘串扰能量明显增强,即串扰度变大。该视区在平行探测器上投影轮廓内各个空间位置上的主副视图能量对比示意如图 11(b)所示,视区边缘串扰明显增强,主视图的能量也明显下降。

统计子区间轮廓内各个位置的串扰度,可以得到探测平面上该子区间轮廓内的平均串扰度,如公式(8)。

$$\mu_{(x,y,z)} = \frac{\sum \text{其他视图亮度}_{(x,y,z)}}{\text{主视图亮度}_{(x,y,z)}} \times 100\% \quad (7)$$

$$u_n^{\text{水平/平行}} = \sum \mu_{(x_i, y_i, z_i)}^{\text{水平/平行}} = \sum \frac{\text{副视图能量}_i}{\text{主视图能量}_i} \times 100\% \quad (8)$$

其中, $n=1, 2 \dots N$, i 为属于视区 n 的各个空间位置标号。

3.4.2 原始模型串扰度估计

依据简化模型与原始模型的简化关系,可以得到原始模型各个视图各个位置的子区间空间边界,进而在原始模型的照度数据上截取合适的位置进行该位置内串扰度的精确计算。如图 12 为本例 1 原始模型的某个可视子区间在水平面和垂直面上 4 个视差图像的照度仿真数据示意图。

又由模型间的简化关系,简化模型地子视区还原后,光源与子视区同方向尺寸等比减小如图 4,主视图的能量与来自其他视图的串扰能量占比保持不变,即可以认为简化模型还原后的来自其

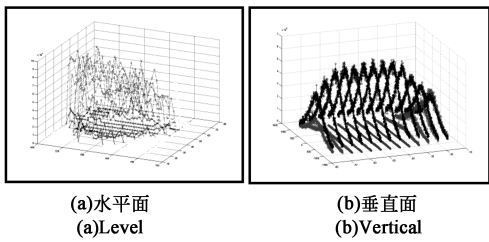


图 11 某子视区理论轮廓面左右图能量对比(狭缝)
Fig.11 Energy contrast between the left and right of views of each position in the outline of the simplified model of a middle sub viewing zone(parallax barrier)

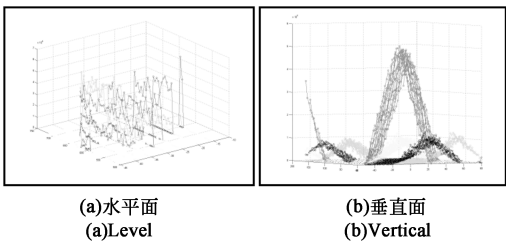


图 12 某视区原始模型理论轮廓面左右图能量对比
Fig.12 Energy contrast between the left and right of views of each position in the outline of the original model of a middle sub viewing zone (parallax barrier)

他图像的串扰程度保持不变,也可以快速的估计原始模型整个空间范围内的串扰度。如本例 1 中模型还原后的串扰度表如表 2 所示。

表 2 19 寸裸眼立体显示器水平面串扰度表(狭缝)
Tab.2 Horizontal plane crosstalk(eg.1)

视区	峰值/ mm	水平张角/ (°)	串扰度估计/%		
			水平	垂直	空间
-15	-448.5	-36.8	10.9	14.0	12.4
-14	-416.1	-34.7	10.9	14.0	12.4
.....					
-1	5.1	0.5	6.3	13.8	9.3
0	37.5	3.6	6.3	13.8	9.3
.....					
9	329.1	28.7	8.1	14.2	10.7
10	365.5	31.1	8.1	14.2	10.7
.....					

3.4.3 子视区空间范围内的串扰度估计

因为实际仿真过程中,探测子视区空间所有位置的照度等能量信息的工程量过于庞大,所以提出一种估算子视区空间范围内的串扰度的方法,如公式(9)。

$$U_n = \sqrt{(u_n^{\text{水平}}) \times (u_n^{\text{垂直}})} \quad (9)$$

其中, $n=1,2\cdots N$ 。

3.5 可视区空间模型

3.5.1 简化模型

根据计算确定的可视区空间中心位置、可视区间个数、水平面内的投影轮廓、平行面内的投影轮廓、水平张角、俯仰角等参数可还原可视区空间简化模型。如图 13 为本例 2 中柱镜光栅裸眼立体显示器 Lighttools 光线加载示意图与依据理论数据模型恢复的可视区简化模型空间分布图。

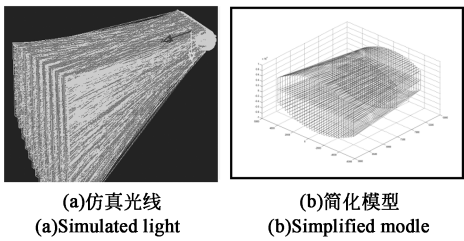


图 13 柱镜光栅空间可视区模型
Fig.13 Spatialstereo viewing zones (cylindrical)

3.5.2 原始模型

根据原始模型与简化模型的空间线性和角度关系如图 14 所示,得到原始模型的可视区空间数据模型。如图 15(a)(b)为本例 1 中的狭缝光线裸眼立体显示器加载光线的原始模型与其数字还原模型。

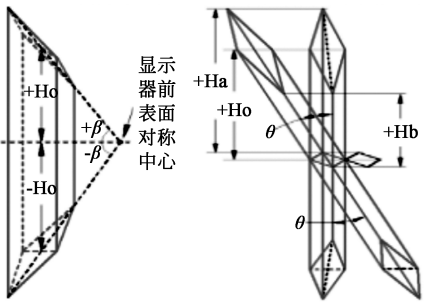


图 14 空间角度关系
Fig.14 Space angle relations

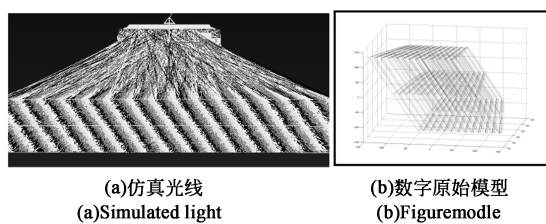


图15 狭缝光栅空间可视区模型

Fig.15 Spatial stereo viewing zones (parallax barrier)

4 结 论

通过在光学仿真软件 Lighttools 上建立相对

简单、易于分析的简化模型,分析该简化模型在空间三个特定平面上的照度数据等,建立简化模型在特定平面的可视区轮廓模型,通过水平张角、俯仰角等空间几何关系建立可是区的三维空间简化模型,并且由简化模型和原始模型的几何关系,得到原始模型可视区在空间各个位置的分布状态。通过上述模型建立和数据分析方式可以明确可视子区间在空间的分布状态,可以方便而相对精确的估计可视区在各个位置、各个平面、甚至整个空间范围内的串扰度水平,对光栅裸眼立体显示器的设计和应用都有一定的指导作用。

参考文献:

- [1] 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.
WANG Q H, PAN D D, LI D H, *et al.* Stereoscopic image crosstalk factor for autostereoscopic display based on parallax barrier[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2010, 21(7): 1058-1061.
- [2] 赵悟翔,李大海,王琼华.三维自由立体显示器的子像素排列方法:中国,CN200710050483.6[P].2010-10-13.
ZHAO W X, LI D H, WANG Q H. Sub pixel arrangement method of three-dimensond free stereoscopic display: China, CN200710050483.6[P]. 2010-10-13.
- [3] 侯春萍,许国,沈丽丽.基于狭缝光栅的自由立体显示器视区模型与计算仿真[J].天津大学学报,2012,45(8): 677-681.
HOU C P, XU G, SHEN L L. Calculation and simulation of viewing zone based on parallax barrier autostereoscopic display [J]. *Journal of Tianjin University*, 2012, 45(8): 677-681. (in Chinese)
- [4] 梁发云,邓善熙,杨永跃.裸眼立体显示液晶屏的光学结构及设计[J].液晶与显示,2005,20(6):544-548.
LIANG F Y, DENG S X, YANG Y Y. Optical structure and designing of nakedness-eye stereoscopic LCD panel [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2005, 20(6): 544-548. (in Chinese)
- [5] DODGSON N A. Autostereoscopic 3D displays[J]. *Computer*, 2005, 38(8): 31-36.
- [6] JÄRVENPÄÄ T, SALMIMAA M. Optical characterization of autostereoscopic 3-D displays[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2008, 16(8): 825-833.
- [7] SALMIMAA M, JÄRVENPÄÄ T. 3-D crosstalk and luminance uniformity from angular luminance profiles of multi-view autostereoscopic 3-D displays[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2008, 16(10): 1033-1040.
- [8] SALMIMAA M, JÄRVENPÄÄ T. Characterizing autostereoscopic 3-D displays[J]. *Information Display*, 2009, 25(1): 8-11.
- [9] 王琼华.3D显示技术与器件[M].北京:科学出版社,2011:87-105.
WANG Q H. *3-D display Technology and Device* [M]. Beijing: Science Press, 2011: 87-105. (in Chinese)

作者简介:李晶(1987—),女,吉林镇赉人,学士,助理研究员,主要从事光学成像方面的研究。E-mail: lijing_opt@126.com

李建军(1973—),男,黑龙江绥化人,博士,主要从事液晶立体显示方面的研究。E-mail: 1744181704@qq.com