

文章编号 1004-924X(2024)09-1408-12

低功耗硅基 OLED 微显示器的区域梯度调光策略

季 渊*, 马新德, 孙严睿, 陈宝良, 张 引
(上海大学 微电子研究与开发中心, 上海 200444)

摘要:针对近眼显示设备存在显示功耗较大的问题,通过研究人眼视觉的特性提出一种人眼凝视点自适应的区域梯度调光算法。首先进行中心凹-亮度掩蔽实验以获取人眼的恰可觉差(Just Noticeable Difference, JND),并在此基础上改进了传统人眼凝视点的几何光路模型,得到更符合人眼自适应特性的几何光路模型,引入最大视角判别法有效提高了视角计算效率。随后,对图像进行预处理时采用改进的对比度增强算法,以在保持图像平均显示亮度基本不变的情况下增强显示效果。根据实验得到的 JND 阈值和凝视点信息,对图像实施了区域和全局功耗限制,从而在降低功耗的同时保持了视觉主观感受。在 FPGA 硬件平台上完成了算法的验证。实验结果表明,该算法在柯达标准测试集下使硅基有机发光二极管(Organic Light Emitting Diode, OLED)微显示器的显示功耗降低 23.05%,基本满足硅基 OLED 微显示器的低功耗显示的要求,可为其性能提升提供指导。

关键词:区域梯度调光;凝视点自适应;微显示器;显示功耗;恰可觉差

中图分类号: TN27 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243209.1408

Regional gradient dimming strategy for low-power silicon-based OLED microdisplays

JI Yuan*, MA Xinde, SUN Yanrui, CHEN Baoliang, ZHANG Yin

(Microelectronics Research and Development Center, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

* Corresponding author, E-mail: jiyuan@shu.edu.cn

Abstract: In addressing the high power consumption of near-eye display devices, this paper introduces a region gradient dimming algorithm that adapts to the human eye's gaze point, informed by studies on human visual characteristics. Initially, a central fovea-brightness masking experiment established the Just Noticeable Difference (JND) threshold for the human eye. This data refined the traditional geometric optical path model of the eye gaze point, resulting in a model that aligns more closely with the eye's adaptive characteristics. The method significantly improved the efficiency of viewing angle calculations through a maximum viewing angle discrimination approach. An enhanced contrast algorithm was then applied during image preprocessing to improve the display quality while preserving the image's average brightness. Utilizing the JND threshold and gaze point data, the algorithm applied both regional and global power consumption limits to the image, reducing power usage while maintaining subjective visual perception. The algorithm underwent validation on an FPGA hardware platform, demonstrating a reduction in display power consumption for silicon-based Organic Light Emitting Diode (OLED) microdisplays by up to 23.05% on the

收稿日期: 2024-01-03; 修订日期: 2024-03-03.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61774101, No. 61674100)

Kodak standard test set. This achievement suggests that the low-power requirements for silicon-based OLED microdisplays are achievable, offering insights for performance enhancements.

Key words: region gradient dimming; gaze point adaptation; microdisplay; display power consumption; Just Noticeable Difference(JND)

1 引言

随着元宇宙概念^[1]和VR技术^[2]的迅猛发展,人们对沉浸式体验的需求不断提升。头戴显示设备通常用于提供AR/VR体验,其中,硅基OLED微显示器^[3-4]以其体积小、响应速度快、显示能耗低、清晰度高等^[5]优点而备受青睐。

然而,显示设备40%~80%的电量却耗费在显示面板上。因此,许多团队致力于研究降低显示面板功耗的方法。Arkhipov等学者提出一种像素点等比例缩放的功耗限制方法^[6],通过一个比例系数乘以原始图像的灰度得到新的灰度值,以此来减小电路中的总电流。Dong和Zhong提出了一种颜色转换法,该方法通过改变图形用户界面^[7]和网页的配色方案^[8]来降低功耗,类似于智能手机中的夜间模式。Wee提出一种基于视觉显著性的OLED低功耗显示方法^[9],从屏幕中心到边缘的显著性依次降低,并划分为多个矩形区域,不同显著性的区域对应不同的调节系数,这种方法比较适合用户主要视觉区域一直位于屏幕中心的情况。Lin等结合人眼的视觉感知系统来感知图像内容^[10],通过评估图像中像素的显著性,将图像划分成多个不同等级的显著性区域,通过保证高显著性区域的亮度,限制低显著性区域的亮度来降低功耗。Kim提出基于注视跟踪的周边调光算法^[11],线性降低凝视区域之外的亮度,并研究了凝视区域尺寸对节能率的影响^[12]。

为了更进一步降低显示功耗,本文通过对人眼凝视特性的深入研究,提出了一种凝视点自适应的多区域梯度调光算法。为解决调光算法可能带来的主客观图像显示质量下降问题,对图像进行对比度增强的预处理,以确保视觉显示效果。在该算法的基础上,设计了基于FPGA的硅

基微显示控制器,验证了该算法在硬件上的可行性,达到了降低显示功耗的目的。

2 视觉观测实验

在生理学和心理学研究中,用恰可视觉差(Just Noticeable Difference, JND)^[13]来表示人眼所能感受到的刺激的最小变化量。受到多种人眼视觉特性的影响,JND包括亮度掩蔽、中心凹掩蔽等特性。中心凹掩蔽特性表明在人眼舒适区范围内,距离中心凹区域范围越远,视敏度越小。为研究亮度掩蔽与中心凹之间的关系,对亮度掩蔽进行心理学实验,实验中不断变换背景亮度和视角。实验设备为Oculus Quest 2,该VR设备的单眼屏幕分辨率为1 832 pixel×1 920 pixel,水平视场角为100°。实验测试人员共20名,男女人数相同,所有人员均通过弗莱堡视力测试,仅知晓基本测试信息。

在中心凹-亮度掩蔽实验^[14]中,测试图像如图1所示,图像中心的高亮点为测试人员的凝视点。测试点的亮度高于背景亮度,背景亮度用 B 表示,高出的数值用 k 表示。当测试人员恰好可察觉到此测试点时, k 即为该点的JND。测试点处的亮度在0~255之间,尺寸为10×10 pixel。

测试过程中,从预设的测试点中每次选取一个测试点进行JND阈值测试,直至全部测试点完成测试。实验设置7组亮度实验组和13组视角实验组,如表1所示。实验结果如图2所示。图2(a)为背景亮度为60时,JND在视角小于10°时保持稳定,在10°~40°内缓慢增加,而在40°之后迅速增大。图2(b)则呈现了JND随着背景亮度和视角变化的关系。在大视场条件下,图像的背景亮度由平均亮度代替。



图 1 中心凹-亮度掩蔽实验测试图

Fig. 1 Test diagram of fovea-brightness masking experiment

表 1 中心凹-亮度掩蔽特性实验数据

Tab. 1 Data of fovea-brightness masking characteristic experiment

属 性	背景亮度	视 角
亮度掩蔽	20, 60, 100, 140,	1, 2, 3, 5, 10, 15, 20,
	180, 220, 240	25, 30, 35, 40, 45, 50

3 区域梯度调光算法

3.1 区域调光算法原理

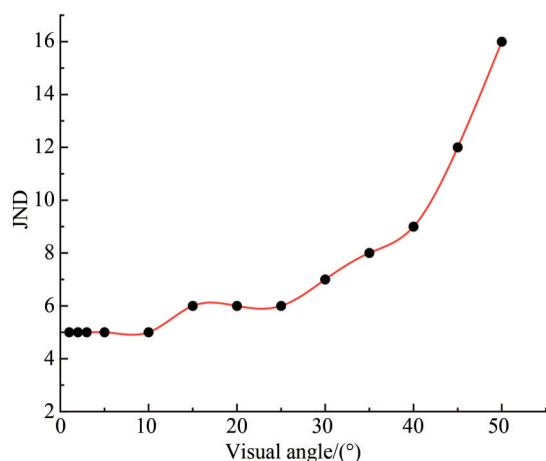
区域梯度调光算法采用以凝视点为中心的

方式,将图像划分为多个区域,根据离凝视点的距离设定相应的亮度限制,从而有效降低显示功耗。算法流程如图 3(a)所示,主要包括以下关键步骤:

(1)颜色空间转换和对比度增强,将图像从 RGB 空间转换到 YUV 空间,并通过裁剪和分段直方图的方式改进传统直方图均衡化。这一步骤旨在一定范围内增强图像的对比度,同时保持增强后图像的亮度接近原图像。

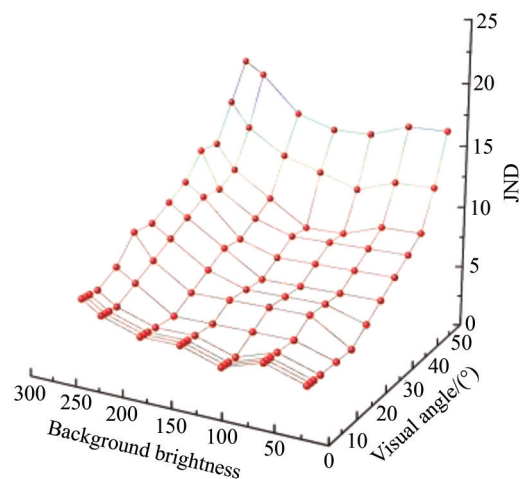
(2)凝视点位置自适应模型优化,根据图像的背景亮度和凝视点位置,计算各像素的视角和各区域限制因子。通过优化传统的凝视几何光路模型,使它适用于凝视点位置的变化。引入最大视角判别法以显著提高视角的计算效率。

(3)区域修正因子融合:根据计算得到的视角信息对图像进行区域划分,然后使用各区域限制因子与原图像进行融合。图 3(b)展示了各区域限制因子随视角的变化情况。在 10° 视角范围内,限制因子保持最小且稳定;随着视角的增大,限制因子逐渐增大,距离凝视点越远的区域,其增大速率越快。



(a) JND与视角的关系

(a) Relationship between JND and viewing angle



(b) JND与背景亮度和视角的关系

(b) Relationship of JND with background brightness and viewing angle

图 2 中心凹-亮度掩蔽实验结果

Fig. 2 Fovea-luminance masking experiment results

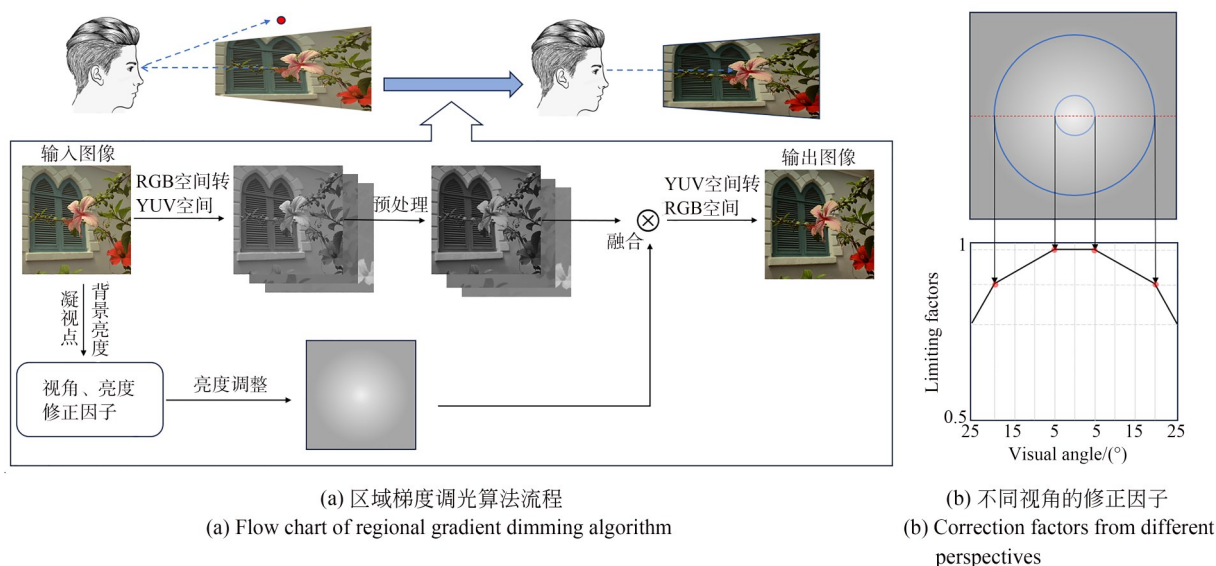


图3 算法流程及修正因子

Fig. 3 Algorithm flow and correction factors

3.2 直方图处理

对于彩色图像,首先需要把图像从RGB空间转换到YUV颜色空间。其中,Y代表亮度信息,U和V代表色彩及饱和度信息。本算法只在亮度分量Y上进行处理,故转换到YUV空间将Y分量与U,V分量分离,保护图像的色彩及饱和度信息。

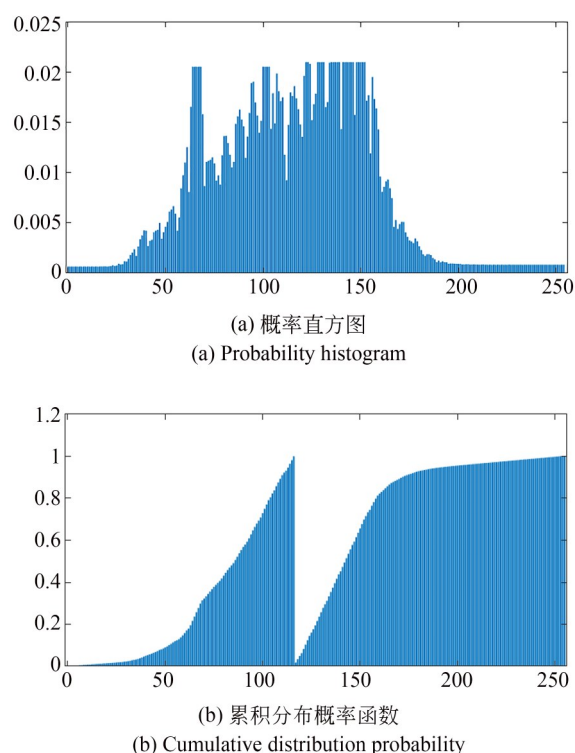
为了降低图像显示质量的损失,采用对比度增强的方法处理原图像。鉴于直方图均衡化算法可能导致图像亮度提升和过度增强的问题,本文选择直方图分段和裁剪的方式进行图像均衡化,从而增强显示效果。直方图分段能在一定程度上保持原始图像的亮度;直方图裁剪则可以防止过多像素的灰度值集中于某一小区间内,有效避免过度增强的情况。在获得原始灰度图像的直方图后,使用图像灰度值的中位数 k_m 对直方图进行分段,将直方图划分为左右两个子直方图。对两个子直方图单独进行裁剪,设置裁剪系数CC(通常设置 $CC=0.01$),将两个子直方图被裁掉的像素总数平均分配到整个灰度级上。重新分配后的概率直方图和累积分布概率函数如图4(a)和4(b)所示。

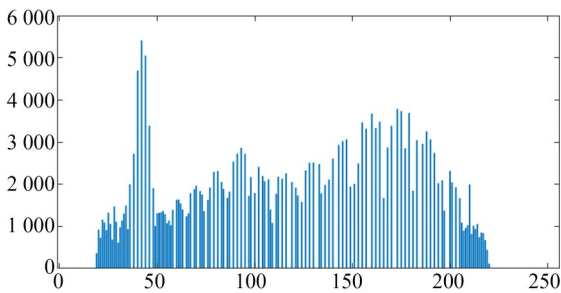
两个子直方图经分段和裁剪处理后,还要进行独立的均衡化操作,得到新的像素点灰度值。

映射后的直方图如图4(c)所示,灰度映射函数为:

$$G(x) = \begin{cases} k_m C_L(x) & 0 \leq x \leq k_m \\ k_m + (255 - k_m) C_u(x) & k_m < x \leq 255 \end{cases} \quad (1)$$

图5为部分图像的处理效果对比。图5(a)为原始图像,图5(b)为传统直方图均衡化处理后





(c) 灰度映射后直方图
(c) Histogram after grayscale mapping

图 4 直方图处理

Fig. 4 Histogram processing

的图像,图 5(c)为本文改进的对比度增强算法处理后的图像。可以观察到,传统直方图均衡化算法导致图像过度增强,从而影响视觉效果。相比之下,本文算法通过直方图裁剪限制了增强幅度,能够呈现出更好的视觉效果。



(a) 原始图像 (b) 传统直方图均衡化 (c) 本算法
(a) Original image (b) Traditional histogram equalization (c) Proposed algorithm

图 5 对比度增强效果处理

Fig. 5 Contrast enhancement effect processing

表 2 列出了全部图像在不同算法处理后的平均亮度数值。可以看出,经直方图均衡化处理后的图像平均亮度接近灰度范围的中值 128;而本文算法通过直方图分段处理,图像平均亮度更接近原图像的平均亮度。在提升视觉显示效果的

同时,图像平均亮度基本保持不变,能够补偿后续由功耗限制处理带来的图像质量降低。

表 2 24 幅测试图像平均亮度对比

Tab. 2 Comparison of average brightness of 24 test images

方法	亮度均值
原图	111.92
直方图均衡化	129
本算法	117.33

3.3 凝视点自适应

预处理后需计算所有像素在某一凝视点位置下所对应的视角。传统几何光路模型^[15]中,人眼视线始终与屏幕保持垂直,这就意味着凝视点被固定在屏幕中央,而人眼在感知视觉信息时凝视点会发生变化,传统模型不再适用。本算法提出了一种凝视点自适应几何光路模型,对该模型进行数学层面抽象处理建立三维坐标系,如图 6(a)所示。设图像尺寸为 $N \times N$,图像中心为原点 O ,凝视点为 $X_g(x_g, y_g, 0)$,任意像素点为 $X(x, y, z)$,人眼为 $P(0, 0, Nv)$, v 表示图像宽度 N 的整数倍, e 为图像任意像素点所对应的视角,即有:

$$e = \arccos \left(\frac{(PX)^2 + (PX_g)^2 - (X_gX)^2}{2 \times PX \times PX_g} \right), \quad (2)$$

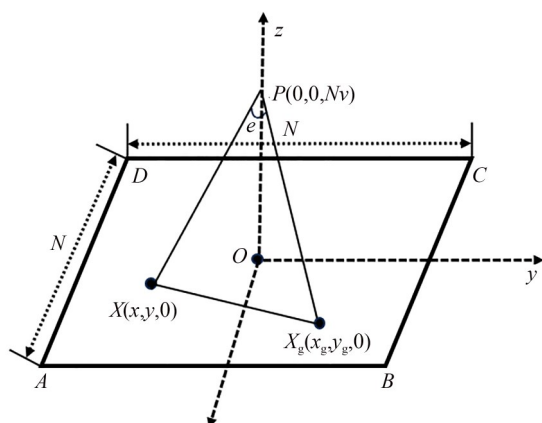
其中: PX_g 为人眼到凝视点的距离, PX 为人眼到任意像素的距离, X_gX 为凝视点到任意像素点的距离,其公式分别为:

$$PX_g = \sqrt{x_g^2 + y_g^2 + (Nv)^2}, \quad (3)$$

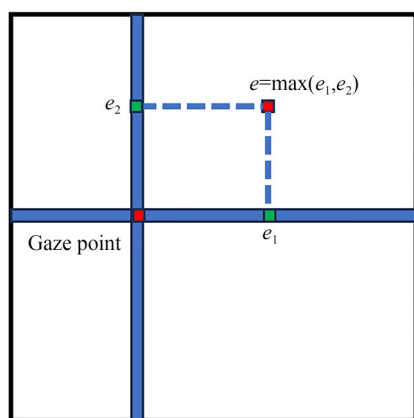
$$PX = \sqrt{x^2 + y^2 + (Nv)^2}, \quad (4)$$

$$X_gX = \sqrt{(x_g - x)^2 + (y_g - y)^2}. \quad (5)$$

以分辨率为 500×500 的图像为例,计算所有像素的视角需要 2.5×10^5 次浮点运算,不仅降低了计算效率,还增加了计算功耗。为了降低运算量,本文提出了最大视角判别法。该方法仅需要计算凝视点所在的行和列上的像素视角,如图 6(b)中粗实线所示。对于其他像素的视角,则取其所在行和列与凝视点所在行和列的两个交点像素中的最大值,如图 6(b)中方块所示。这一方法有效减少了计算量,计算效率提高了 80% 左右,同时降低了整体的计算功耗。



(a) 凝视点自适应几何光路模型
(a) Model of gaze point adaptive geometric optical path



(b) 最大视角判别法
(b) Maximum viewing angle discriminant method

图6 视角计算

Fig. 6 Perspective calculations

3.4 功耗限制

图像经过改进的对比度增强预处理算法后,需要进行显示功耗的限制,本文从区域和全局两个方面入手。在全局限制方面,针对所有像素进行操作,通过限制因子与原始像素亮度值相乘来计算新的亮度值。这一方法实现了所有像素亮度值的等比例调节,从而对整体图像的亮度进行全局性控制。在区域限制方面,根据人眼视觉特征和凝视点位置将图像划分为不同区域。每个区域对应一个特定的区域限制因子,通过这些因子实现对不同区域像素亮度值的多梯度调节。这种方法考虑人眼对图像的局部感知差异,提高了对图像显示功耗的精细控制程度。某一像素

点的亮度值调整为:

$$X' = X \cdot (1 - \alpha) \cdot (1 - \beta), \quad (6)$$

其中: X' 为调整后亮度值, X 为原亮度值。

3.4.1 区域功耗限制

定义JND与背景亮度 B 的比值 α 为区域限制因子,如下:

$$\alpha = \frac{JND}{B}. \quad (7)$$

α 在不同背景亮度下随视角的变化如图7(a)所示。在 10° 视角范围内, α 的值基本保持不变,称为凝视区;在 $10^\circ \sim 40^\circ$ 视角内, α 随视角的增大而增大,近似于一次函数,称为次凝视区;而在 40° 以上的视角范围内, α 的规律与次凝视区相似,增长率略大,称为非凝视区。为了简便计算,将 α 拟合为多段线性函数,如下:

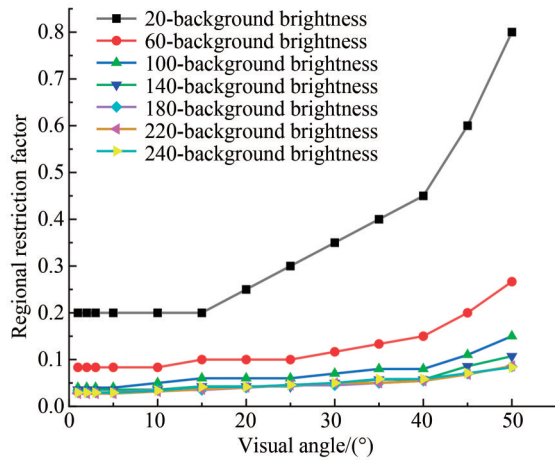
$$\alpha = \begin{cases} a, & e \leq 10, \\ a + b \cdot e, & 10 < e \leq 40, \\ a + b \cdot 30 + c \cdot e, & e > 40 \end{cases} \quad (8)$$

其中 a, b, c 的值与背景亮度 B 有关。

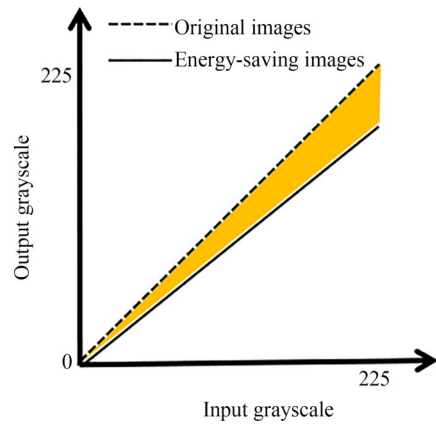
图7(c)为经过区域功耗限制处理的图像,其中圆叉表示人眼凝视点的位置。最左面为原始图像,右面图像展示了凝视点从图像左上角向右下角移动的情况。从图中可以观察到,随着凝视点的移动,图像左上方房顶的亮度逐渐变暗,而图像右下方杂草的亮度逐渐变亮。结合人眼视觉系统和所提出的算法可知,同一幅图像中凝视点附近区域的人眼视角较小,JND阈值较小,因此对亮度的调整较小;而距离凝视点越远,人眼视角越大,对亮度的调整越大。这符合人眼主观视觉感受,也说明该算法在图像处理中更加符合人眼视觉特性,所得图像在不同凝视点位置呈现出更自然、更符合人眼感知的亮度变化。

3.4.2 全局功耗限制

定义 β 为全局限制因子,表示对全部像素的功耗限制。图7(b)为全局亮度限制映射函数,其中阴影部分表示节省的亮度。对于一幅图像,可以根据图像质量或者节能率的要求来调整 β 。图7(d)展示了不同 β 值下的图像,最左侧为原图像,右面图像的 β 值分别为0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25。



(a) 在不同背景亮度下 α 与视角的关系
(a) Relationship of α to the viewing angle at different background brightnesses



(b) 全局亮度修正映射函数
(b) Global brightness correction mapping function



(c) 不同凝视点时区域功耗限制处理图像
(c) Area power consumption limits processed images at different gaze points



(d) 不同 β 值时全局功耗限制处理图像
(d) Global power consumption limits processed images at different β values

图 7 区域、全局限制因子和区域、全局功耗限制处理图像

Fig. 7 Regional, global throttling factors, and regional, global power limits processed images

3.4.3 联合功耗限制

为了进一步降低功耗,本文将区域功耗限制和全局功耗限制进行联合。为了找到合适的 β 值,需要对图像质量进行分析,采用主观平均得分(Mean Opinion Score, MOS)和客观质量评价参数进行评价。

主观平均得分是指多名观察者根据事先约定的规则和自身经验,为待评价图像打分或分类,并计算出每一幅待评价图像的平均分,通常分为5个等级:5分为非常好,4分为好,3分为一般,2分为差,1分为非常差。客观质量评价采用

多尺度结构相似性指数^[16](Multi Scale Structural Similarity Index Measure, MS-SSIM)和图像增强测度^[17](Enhancement Measure Evaluation, EME)两种指标。MS-SSIM是基于人眼视觉系统在不同尺度下评价一幅图像与原图像的相似性,相比单一尺度的结构相似性指数具有更好的适用性,数值介于0~1之间,数值越接近1表示与原图像的相似性越高。图像增强评价指标是基于人眼视觉特性的图像局部对比度测量指标,该值越大,表明图像的局部对比度越高。这种综合主观和客观评价的方法有助于更全面地评估

图像处理的效果,既考虑了人眼主观感受,也借助了客观参数来量化图像质量的变化。图8为使用不同 β 处理后图像主、客观评价结果。

随着 β 值的不断增大,主观得分在 $\beta=0.1$ 时

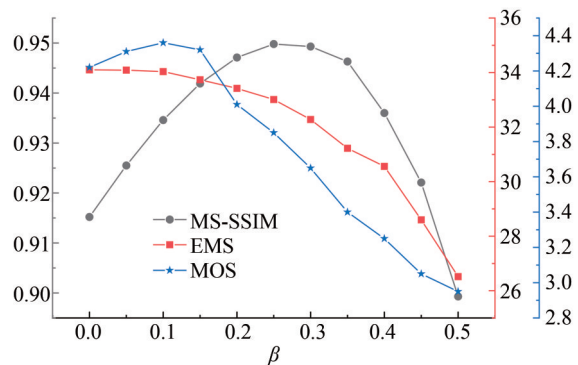


图8 不同 β 时的图像质量评价

Fig. 8 Image quality evaluation at different β

最高,随后开始迅速降低;多尺度结构相似性在 β 小于0.25时逐渐增大,随后开始减小,结果都在0.9以上;图像增强测度在不断减小。为在节能率和图像显示质量之间取得平衡, β 建议取在0.1~0.15之间。

图9展示了经过区域和全局功耗限制处理的结果,其中圆叉表示人眼凝视点的位置。图9(a)为原始图像,图9(b)~9(d)的凝视点分别为(50, 50), (150, 150), (250, 250)。

表3为部分图像在凝视点为(250, 250)时的客观评价结果。从表3可以看出,随着视角的增大,EME逐渐减小,MS-SSIM逐渐增大。这是因为离凝视点越远的区域对其的亮度限制越大,对比度逐渐减小,而图像本身的对比度较小,非凝视区域与原图像更接近。MS-SSIM的数值均在0.95左右,图像的整体显示质量较好。

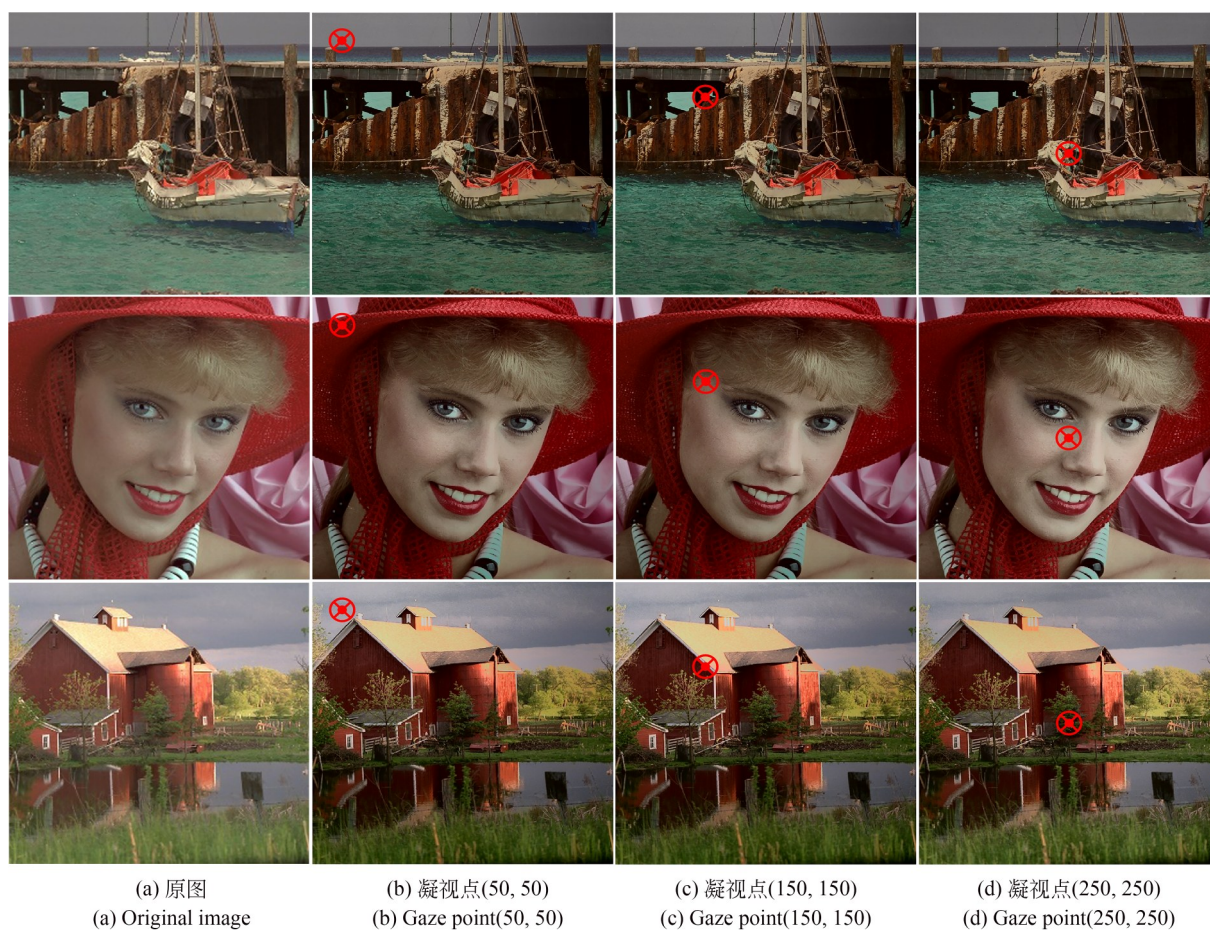


图9 不同凝视点显示效果对比

Fig. 9 Comparison of display effects of different gaze points

表 3 区域调光算法处理后部分图像的评价指标

Tab. 3 Some image evaluation indexes after processing by regional dimming algorithm

图 像	EME			MS-SSIM		
	0°~10°	10°~40°	40°以上	0°~10°	10°~40°	40°以上
kodim01	63.231 5	63.031 1	60.690 8	0.951 5	0.958 7	0.963 4
kodim05	68.520 4	62.035 2	58.345 2	0.953 9	0.956 1	0.960 1
kodim06	32.011 3	32.014 2	31.236 3	0.973 1	0.974 1	0.975 3
kodim09	16.204 8	17.037 1	15.104 5	0.962 9	0.965 3	0.967 4
Kodim13	51.461 4	50.452 9	49.175 4	0.953 9	0.955 3	0.956 3
Kodim17	37.735 2	34.676 6	32.382 2	0.960 6	0.965 9	0.968 4
Kodim20	18.460 0	15.815 1	15.611 3	0.966 0	0.967 8	0.965 1
Kodim24	27.452 8	27.439 4	26.967 3	0.931 8	0.939 7	0.946 2

表 4 为在图像平均亮度降低 23% 的情况下,区域梯度调光算法与另外两种算法的评价结果对比。区域梯度调光算法的 MS-SSIM 略低于其他两种算法,但保持在 95% 左右,能较好地保持图像结构。区域梯度调光算法的 EME 和主观得分明显优于其他两种算法和原图像,这是由于线性算法处理的图像整体亮度偏暗,显示效果差,周边调光算法并未定量测试人眼视觉特性,导致图像处理后人眼能察觉到凝视区域以外与凝视区域的亮度差异;而多区域梯度调光算法不仅利用人眼 JND 阈值进行定量处理,使人眼难以察觉显示差异,还在图像预处理时对图像的对比度进行一定的增强,从而明显提升了图像的细节和显示效果,在视觉显示效果上的表现更为出色。

表 4 不同算法处理后图像评价指标

Tab. 4 Image evaluation indexes after processing by different algorithms

算 法	MOS	EME	MS-SSIM
原图像	4.0	21.590 2	1
线性调光	3.5	21.587 6	0.977 0
周边调光	3.9	21.583 4	0.965 3
区域梯度调光	4.2	33.753 1	0.947 1

4 FPGA 验证平台

4.1 硬件框架

使用现场可编程逻辑门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)作为测试验证平台,证明本文所提算法及基于此的硅基 OLED 微显示

器的硬件可行性。其中, FPGA 芯片选用 Altera 公司的 Cyclone IV 系列的 EP4CE55F23C6N 产品,该款 FPGA 芯片有 55 856 个逻辑单元,可配置的 I/O 的数量为 324 个,最大工作频率为 315 MHz。硬件系统结构框架如图 10(a) 所示,主要包括视频源、视频控制模块以及硅基 OLED 微显示器 3 个部分,硅基 OLED 微显示器的参数指标如表 5 所示。

表 5 硅基 OLED 微显示器的参数指标

Tab. 5 Parameters of silicon-based OLED microdisplays

参 数	值
驱动方式	全数字 PWM
像素分辨率	$2\,048 \times (3) \times 2\,048$
屏幕尺寸	1.3 inch
像素面积	$3.8(\times 3) \mu\text{m} \times 11.4 \mu\text{m}$
数据带宽	28.69 Gbit
像素时钟	112 MHz

计算机中的视频源通过高清多媒体接口(High Definition Multimedia Interface, HDMI)将视频信号送入 FPGA 内部的视频控制模块中。视频控制模块包括图像处理模块和扫描控制模块。当一帧图像传入时,将图像保存在两个数据缓存块中。第一个数据缓存块采用 4 个先进先出(First Input First Output, FIFO)结构,根据凝视点的位置计算图像背景亮度和其余像素的视角,根据背景亮度和像素视角得到全局和局部修正因子。第二个缓存块采用同步动态随机存取内存(Synchronous Dynamic Random-access Memory, SDRAM),经过改进的直方图均衡化算法对

图像进行预处理,得到新的图像以更新 SDRAM 中存储的数据。使用限制因子将功耗限制后的图像数据保存在输出数据缓存块中。由于图像预处理和限制因子的计算可以并行执行,同时视频中的每帧图像也可以进行流水线处理,提升了算法的执行效率。扫描控制模块收到驱动使能信号后通过 LUT 查找表对输出数据缓存块进行寻址,完成一帧图像的读取,最后通过低电压差分信号 (Low-Voltage Differential Signaling, LVDS) 将同步信号和数据信息发送给硅基 OLED 微显示器。

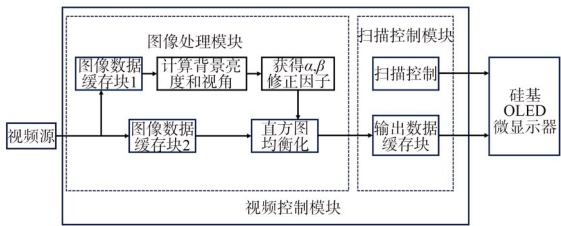
4.2 验证结果

使用 24 张柯达标准图像测试集作为测试图像,分辨率为 500×500 pixel,图 10(b)为在 FPGA 硬件测试平台上显示经区域梯度调光处理后的图像效果。

结合人眼视觉系统和所提算法可知,对于同一幅图像,凝视点附近区域的人眼视角小,JND 阈值小,对亮度的调整小;离凝视点距离越远,人眼视角越大,对亮度的调整越大,符合人眼主观视觉感受。表 6 显示凝视点为 (250,250) 时系统各部分功耗,功耗 P 的计算公式为:

$$P = UI, \tag{9}$$

其中 U 和 I 分别表示电压和电流,由万用表测得。



(a) 基于FPGA的硬件系统结构框架
(a) FPGA-based hardware system architecture framework



(b) FPGA硬件测试平台
(b) FPGA hardware test platform

图 10 基于 FPGA 的硬件系统结构框架及测试平台
Fig. 10 FPGA-based hardware system architecture framework and test platform

表 6 凝视点为 (250,250) 时系统各部分功耗
Tab. 6 Power consumption of each part of system at gaze point of (250, 250)

测试图像	P_o	P_c	P	$\eta/\%$
kodim01	46.62	4.98	31.50	21.75
kodim02	29.35	4.56	18.42	21.70
kodim03	38.12	5.67	26.73	15.01
kodim04	35.45	5.21	23.06	20.25
kodim05	30.51	5.32	19.34	19.17
kodim06	60.44	4.89	44.82	17.75
kodim07	45.86	5.28	31.07	20.74
kodim08	54.45	4.84	37.68	21.91
kodim09	65.45	5.30	47.31	19.62
Kodim10	59.68	5.32	43.74	17.79
Kodim11	37.43	5.12	24.96	19.64
Kodim12	88.53	4.34	66.44	20.05
Kodim13	48.35	4.23	33.72	21.51
Kodim14	41.23	4.89	28.23	19.67
Kodim15	27.75	5.45	17.13	18.63
Kodim16	42.92	4.84	29.25	20.57
Kodim17	34.91	4.67	23.38	19.65
Kodim18	25.55	4.56	15.94	19.77
Kodim19	57.49	4.95	40.31	21.27
Kodim20	91.58	5.04	68.42	19.79
Kodim21	50.14	5.12	36.30	17.39
Kodim22	51.73	4.34	34.96	24.03
Kodim23	53.31	4.85	38.88	17.97
Kodim24	44.15	4.77	31.53	17.78
平均值	48.38	4.94	33.88	19.26

节能率为:

$$\eta = \frac{P_o - P_c - P}{P_o}, \tag{10}$$

其中: P_o 表示原图像显示功耗, P 表示经算法硬件处理后图像的显示功耗, P_c 表示计算功耗,其计算方式是用 P_o 减去将图像提前进行算法软件处理后进行显示的显示功耗,即图像处理模块的额外功耗。经计算,24 幅图像的平均节能率为 19.26%。表 7 显示不同凝视点情况下的平均节能率,随着凝视点往图像边缘移动,节能率逐渐增大,最高可达 23.05%。

表 7 不同凝视点的节能率

Tab. 7 Energy saving rates at different gaze points

凝视点位置	平均节能率/%
(50,50)(边缘点)	23.05
(150,150)(中间点)	22.23
(250,250)(中心点)	19.26

5 结 论

本文针对硅基 OLED 微显示器的显示功耗问题,结合人眼视觉特征提出了一种基于凝视点的区域梯度调光算法。该算法的设计基于中心

凹-亮度掩蔽实验,得到人眼在不同背景亮度和视角情况下的 JND 阈值,根据凝视点位置和图像特征得到区域和全局限制因子,实现分区域梯度降低凝视点周边显示亮度。引入最大视角判别法显著降低了求解视角过程的计算量,并采用直方图分段和裁剪技术对图像进行预处理,以对客观图像质量进行补偿。在 FPGA 上对该算法进行验证,结果表明,在保持人眼主观感受和客观图像质量的前提下,在柯达标准测试集下最高可节省 23.05% 的显示功耗。这一算法综合考虑了人眼特性、图像处理和硬件实现,在显示功耗优化方面取得了明显的效果,为硅基 OLED 微显示器的性能提升提供了指导。

参考文献:

- [1] GUAN J, MORRIS A. Design frameworks for hyper-connected social XRI immersive metaverse environments [J]. *IEEE Network: the Magazine of Global Internetworking*, 2023, 37(4): 12-21.
- [2] 张量, 金益, 刘媛霞, 等. 虚拟现实(VR)技术与发展研究综述[J]. *信息与电脑(理论版)*, 2019, 31(17): 126-128.
ZHANG L, JIN Y, LIU Y X, *et al.* Review of virtual reality (VR) technology and development [J]. *China Computer & Communication*, 2019, 31(17): 126-128. (in Chinese)
- [3] 季渊, 许怡晴, 陈宝良, 等. 硅基微显示器发展现状与研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(20): 2011007.
JI Y, XU Y Q, CHEN B L, *et al.* Development and research progress of silicon-based microdisplays [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(20): 2011007. (in Chinese)
- [4] VOGEL U, WARTENBERG P, RICHTER B, *et al.* OLED-on-silicon microdisplays: technology, devices, applications[C]. 2018 48th European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC). September 3-6, 2018. Dresden, Germany. IEEE, 2018.
- [5] KWAK B C, KWON O K. A 2822-ppi resolution pixel circuit with high luminance uniformity for OLED microdisplays[J]. *Journal of Display Technology*, 2016, 12(10): 1083-1088.
- [6] ARKHIPOV A, LEE B W, PARK K, *et al.* Using net power control for AMOLED TV[J]. *IMID*, 2007, 7(1): 47-50.
- [7] DONG M, ZHONG L. Power modeling and optimization for OLED displays[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2012, 11(9): 1587-1599.
- [8] DONG M, ZHONG L. Chameleon: a color-adaptive web browser for mobile OLED displays [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2012, 11(5): 724-738.
- [9] WEE T K, BALAN R K. Adaptive display power management for OLED displays [C]. *Proceedings of the first ACM international workshop on Mobile gaming*. 13 August 2012, Helsinki, Finland. ACM, 2012: 25 - 30.
- [10] LIN C H, KANG C K, HSIU P C. CURA: a framework for quality-retaining power saving on mobile OLED displays[J]. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, 15(4): 76.
- [11] KIM J S, LEE S W. Peripheral dimming: a new low-power technology for OLED display based on gaze tracking[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 209064-209073.
- [12] KIM J S, JEONG W B, LEE S W. Central zone size dependence of peripheral dimming technique under wide field of view environment [J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 128514-128522.
- [13] WU J J, QI F, SHI G M. An improved model of pixel adaptive just-noticeable difference estimation [C]. 2010 *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. March 14-19, 2010. Dallas, TX, USA. IEEE, 2010.

- [14] 季渊,郑志杰,吴浩,等. 立体视觉中心凹 JND 模型及其图像压缩硬件实现[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1210001.
JI Y, ZHENG Z J, WU H, *et al.* Foveated JND model based on stereo vision and its application in image compression with hardware implementation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(12): 1210001. (in Chinese)
- [15] 季渊,陈远生,宋远胜,等. 人眼凝视点自适应的近眼显示控制器[J]. 光学精密工程, 2021, 29(1): 191-200.
JI Y, CHEN Y SH, SONG Y SH, *et al.* Human eye gaze point adaptive near-eye display controller design[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(1): 191-200. (in Chinese)
- [16] WANG Z, SIMONCELLI E P, BOVIK A C. Multiscale structural similarity for image quality assessment[C]. *The Thrity-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers*, 2003. *GrovePacific, CA, USA*. IEEE, 2003: 1398-1402.
- [17] YE Z M, MOHAMADIAN H, YE Y M. Discrete entropy and relative entropy study on nonlinear clustering of underwater and arial images[C]. *2007 IEEE International Conference on Control Applications*. *October 1-3, 2007. Singapore*. IEEE, 2007.

作者简介:



季 渊(180—),男,上海人,博士,副研究员,2002年、2005年、2012年于上海大学分别获得学士、硕士和博士学位,2013~2014年在美国明尼苏达大学电气工程与计算机系从事博士后研究,主要研究方向为有机发光微显示器、微电子与集成电路设计、多媒体嵌入式处理器与片上系统。E-mail:jiyuan@shu.edu.cn



马新德(1999—),男,山东青岛人,硕士研究生,主要研究方向为数字图像处理、微电子与集成电路设计。E-mail:xinde_ma@163.com