

引用格式: JI Yuan, ZHANG Kaiwen, CHEN Wendong, et al. Dynamic False Contour Quantification and Improvement Strategy of Digital Driven OLED[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(9):0911002

季渊, 张凯文, 陈文栋, 等. 数字驱动型 OLED 的动态假轮廓量化及改善策略[J]. 光子学报, 2021, 50(9):0911002

# 数字驱动型 OLED 的动态假轮廓量化及改善策略

季渊<sup>1,2</sup>, 张凯文<sup>1</sup>, 陈文栋<sup>2</sup>, 穆廷洲<sup>2</sup>, 龚淑萍<sup>1</sup>

(1 上海大学 微电子研究与开发中心, 上海 200444)

(2 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200444)

**摘要:** 针对数字驱动型 OLED 在显示运动画面时会出现动态假轮廓现象, 严重影响人眼观看质量的问题, 通过分析动态假轮廓产生机理, 考虑人眼的视觉特性, 提出最小可察觉失真积分法来量化不同扫描策略产生的动态假轮廓, 并通过实验验证该评估方法的可靠性。将线性脉宽调制法和分形扫描法结合, 提出偏分形的扫描策略来改善动态假轮廓现象。当线性脉宽调制法和分形扫描法的数据位数都为 4 bit 时, 在分辨率 1 280×1 024 的硅基 OLED 微显示器上进行现场可编程门阵列的系统验证, 人眼不会察觉到动态假轮廓现象。利用最小可察觉失真积分法对偏分形扫描算法进行评估, 相比传统 19 子场和分形扫描, 任意两灰度间的动态假轮廓量化均值分别降低约 87.86% 和 86.51%。

**关键词:** 有机电致发光二极管; 运动图像; 脉宽调制; 分形; 现场可编程门阵列

中图分类号: TN27

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215009.0911002

## Dynamic False Contour Quantification and Improvement Strategy of Digital Driven OLED

JI Yuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Kaiwen<sup>1</sup>, CHEN Wendong<sup>2</sup>, MU Tingzhou<sup>2</sup>, GONG Shuping<sup>1</sup>

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

(2 School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

**Abstract:** Aiming at dynamic false contour phenomenon may appear when digital driven OLED displays moving pictures, which affects the viewing quality of human eyes, the mechanism of dynamic false contour generation is analyzed, and the visual characteristics of the human eye are considered. Just noticeable distortion integral method is proposed to quantify the dynamic false contour generated by different scanning strategies, the reliability of the evaluation method is verified through experiments. The linear pulse width modulation method and the fractal scanning method are combined, the partial fractal scanning strategy is proposed to improve the dynamic false contour phenomenon. When the data bits of the linear pulse width modulation method and the fractal scanning method are both 4 bit, the system verification of field programmable gate array is performed on a silicon-based organic light-emitting diodes microdisplay with a resolution of 1 280×1 024, and the dynamic contour phenomenon may not be perceived by the human eye. Just noticeable distortion integral method is used to evaluate the partial fractal scanning algorithm, compared with the traditional 19 subfields and fractal scanning, the average value of dynamic false contour quantization between any two gray levels is reduced by about 87.86% and 86.51%.

基金项目: 国家自然科学基金(Nos.61674100, 61774101), 军民融合发展专项(No. 2019-jmrh1-kj37)

第一作者: 季渊(1980-), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为有机发光微显示、集成电路设计。Email: jiyuan@shu.edu.cn

通讯作者: 张凯文(1997-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为集成电路设计。Email: kkevin\_zhang@163.com

收稿日期: 2021-04-09; 录用日期: 2021-07-09

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

**Key words:** Organic light-emitting diodes; Motion pictures; Pulse width modulation; Fractals; Field programmable gate array

**OCIS Codes:** 110.2970; 230.2090; 100.4145; 330.2210; 220.4830

## 0 引言

随着 5G 和人工智能的迅速发展,以虚拟现实(Virtual Reality, VR)和增强现实(Augmented Reality, AR)为代表的可穿戴显示领域蓬勃发展,虚拟显示行业的发展推动着 OLED 向 AR, VR 等领域渗透<sup>[1-2]</sup>。但是随着 OLED 朝着更高分辨率的方向发展,人们对图像的显示质量要求也越来越高。目前有机电致发光二极管(Organic Light-Emitting Diode, OLED)微显示的驱动方式多为数字驱动,其相比模拟驱动具有精度高、显示画面质量稳定、切换速度快等优点<sup>[3]</sup>。但是在显示运动画面时,人眼能感受到不存在于原图像的线状噪音,研究者们把这一现象称为动态假轮廓(Dynamic False Contour, DFC)。目前针对 DFC 的量化方法,应用比较多的有距离法<sup>[4]</sup>,相对比值法<sup>[4]</sup>和动态积分法<sup>[5]</sup>。此外研究者们也提出了许多扫描策略来改善或消除 DFC,比如子场优化法<sup>[6]</sup>、脉宽调制法<sup>[7]</sup>、自适应非对称抖动区域法<sup>[8]</sup>等。

目前对 DFC 的研究大多集中在传统的微显示器上,本文针对数字驱动型 OLED 微显示器产生 DFC 的机理,在动态积分法的基础上考虑了人眼的视觉特性并将量化标准归一化,提出了最小可察觉失真(Just Noticeable Distortion, JND)积分法,通过实验对该评估方法进行了验证,可对不同扫描策略产生的 DFC 进行量化。由于线性脉宽调制(Linear Pulse Width Modulation, LPWM)法<sup>[7]</sup>在显示运动画面时不会产生假轮廓,提出了偏分形的扫描策略用来减小 DFC,并在分辨率为 1 280×1 024 的硅基 OLED 微显示器上实现了视频图像的实时显示,验证了该扫描策略的可行性。

## 1 动态假轮廓产生机理

在播放运动画面时,如图 1 所示,在灰度级变化不是很大的区域(比如皮肤),人眼很容易观察到高于原显示灰度的亮条纹和低于原显示灰度的暗条纹。而当图像静止时,人眼观察的显示画面正常。图 2 为人眼对静止图像和运动图像在一帧时间内的亮度积分。运动图像的运动速率为 2 像素/帧,灰度级由 127 变化到 128,子场法的编码序列为 128:64:32:16:8:4:2:1。假设人眼能将运动图像定位在视网膜的中心,根据人眼的视觉暂留效应<sup>[9]</sup>,由于子场法选择的发光子场在一帧时间内分布不连续,导致人眼能观察到明显的亮条纹。LPWM 法在人眼积分过程中不会出现高于或低于显示灰度的灰度值,也就不存在 DFC 现象。



图 1 DFC 仿真图像

Fig. 1 DFC simulation image

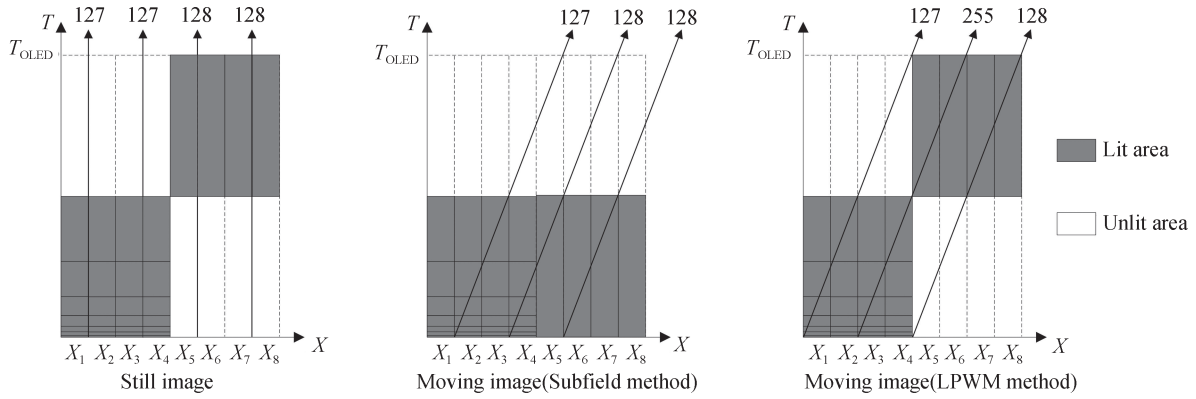


图2 数字驱动型 OLED 的 DFC 形成原理  
Fig. 2 DFC principle of digital driven OLED

## 2 DFC 评估方法

目前对 DFC 的量化存在着一些问题,距离法与 DFC 的产生机理无关,只与子场权值大小有关。相对比值法计算的是某一灰度级的 DFC 量化值,而 DFC 发生在两个灰度变化中。除此之外,两者都没有考虑到变化灰度区域之间的运动方向和运动速度等问题。本文根据人眼的视觉特性,对动态积分法进行优化,使得评估结果更符合人眼的直观感受。

### 2.1 JND 积分法

人眼存在着视觉阈值, JND 提供了一个可见度阈值来描述图像的视觉冗余,影响 JND 的主要因素有两个:一是亮度的对比效应,人眼对亮度对比度的敏感度高于绝对亮度值;二是纹理掩蔽效应,图像的纹理区域相比光滑和边缘区域隐藏了更多人眼察觉不到的误差。将文献[10]提出的 JND 模型引入到 DFC 的评估中,在该模型下,每个像素的 JND 值可以表示为

$$\text{JND}_Y^S(x, y) = T^l(x, y) + T_Y^t(x, y) - C_Y^t \times \min [T^l(x, y), T_Y^t(x, y)] \quad (1)$$

式中,  $T^l(x, y)$  为亮度可见阈值,  $T_Y^t(x, y)$  为纹理遮挡的可见阈值,  $C_Y^t$  为  $T^l(x, y)$  和  $T_Y^t(x, y)$  的重合权值。动态积分法虽然解决了距离法和相对比值法在使用过程中出现的问题,但对灰度差的限制过于绝对。首先不同的灰度差对 DFC 的影响不同,灰度差过大时,人眼对灰度变化的敏感程度高于 DFC,基本上感受不到假轮廓的存在。其次相同的灰度差,灰度级越大,两变化灰度对应发光子场的最高权值相差越大,从而对 DFC 的影响越大。故灰度差对 DFC 的影响与灰度本身有关系,灰度级越大,灰度差对假轮廓的影响越大,可将变化两灰度均值的倒数作为灰度差的影响因子。此外动态积分法有两个评估标准——亮条纹值和暗条纹值,当子场的权值顺序打乱时,存在着亮暗条纹值同时存在的现象,无法评估 DFC 的大小。由于人眼对灰度的感知是一帧时间内对亮度的积分,故人眼感受到的灰度大小应该是人眼积分过程中明显异于显示灰度的灰度值,故取影响因子最大的亮条纹/暗条纹值作为人眼感知 DFC 的大小。本文提出 JND 积分法来量化 DFC,灰度级  $a$  与  $b$  之间的 DFC 评估公式为

$$T_{\max} = d_{\max} - \max(a, b), T_{\min} = d_{\min} - \min(a, b) \quad (a \neq b) \quad (2)$$

$$T_{\max} = 0, T_{\min} = 0 \quad (a = b) \quad (3)$$

$$\text{DFC}_{\text{eva}} = \begin{cases} \frac{2 \times \max(T_{\max}, T_{\min})}{a + b} & (\max(T_{\max}, T_{\min}) > \text{JND}_{\text{th}}) \\ 0 & (\max(T_{\max}, T_{\min}) \leq \text{JND}_{\text{th}}) \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $d_{\max}$ 、 $d_{\min}$  是人眼在一帧时间内亮度积分的最大值和最小值,  $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$  分别为亮暗条纹值,  $\text{DFC}_{\text{eva}}$  为 DFC 的量化结果,  $\text{JND}_{\text{th}}$  为图 3(a) 所示变化灰度区域之间中心点的 JND 阈值,具体的计算流程如图 3(b)。JND 积分法从 DFC 产生的机理出发,考虑了灰度差的影响,并将 JND 模型引入到 DFC 的评估中,使评估结果更加符合人眼的实际观察效果。

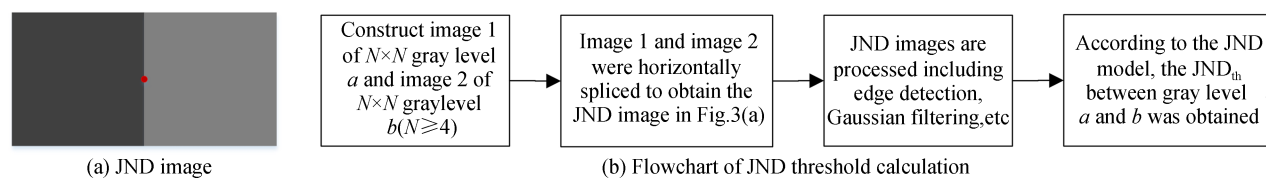


图3 JND阈值的计算流程  
Fig 3 JND threshold calculation process

## 2.2 视觉感知实验

为了验证JND积分法的可靠性,在分辨率为 $1280 \times 1024$ 的硅基OLED微显示器上进行了如图4所示的实验,将两幅不同灰度级的图像拼接成一幅图像。针对不同的子场编码序列,匀速移动拼接图像,借助放大镜观察两灰度交接处的亮度变化。实验涉及的影响因素有三个:灰度差、亮暗条纹值和JND阈值。实验的环境温度和相对湿度都在VESA标准<sup>[11]</sup>所规定的范围之内。共有20人参加了实验,其中男12人,女8人,年龄范围在22~33周岁,平均年龄为25.3周岁,所有受测者的双眼视力(或矫正后视力)均达到1.0以上。实验采用ITU-RBT.500标准<sup>[12]</sup>中规定的5分制方法对所感知的DFC明显程度进行评分,分值越高代表人眼感知的DFC程度越轻。实验过程中,取两个变量,一个是亮暗条纹值中的最大影响因子,另一个是亮暗条纹值中的最大影响因子与灰度差的比值 $\alpha$ 。保持其中一个影响变量为默认值,改变另一个参数完成测试。当JND阈值大于亮暗条纹值时,人眼不会察觉到DFC现象。表1为实验的部分结果,评测结果取20组观察数据的平均值,可见JND积分法的客观评价结果与主观实验评分结果高度一致。结果表明:采用JND积分法可以更加准确、客观地评估动态假轮廓的大小。

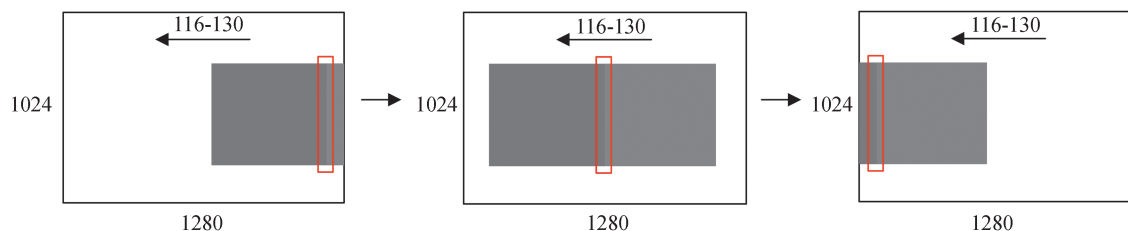


图4 动态假轮廓的观察实验  
Fig. 4 Observation experiment of dynamic false contour

表1 子场编码32:1:4:128:64:16:2:8下DFC的观察结果

Table 1 Observation results of DFC under subfield coding 32:1:4:128:64:16:2:8

Experiment	Gray change	Gray difference	$d_{max}$	$d_{min}$	$T_{max}$	$T_{min}$	$\alpha$	$JND_{th}$	$DFC_{eva}$	Score
Exp1	118~128	10	210	82	82	36	8.200	4	0.667	2.2
	115~132	17	214	82	82	33	4.824	4	0.664	2.2
	69~59	10	101	33	32	26	3.200	9	0.500	2.9
	200~186	14	232	168	32	18	2.286	6	0.166	4.8
Exp2	103~133	30	199	71	66	32	2.200	6	0.559	2.7
	159~169	10	191	159	22	0	2.200	5	0.134	4.9
	192~180	12	228	164	36	16	3.000	5	0.194	4.2
Exp3	67~55	12	103	39	36	16	3.000	9	0.590	2.3
	39~40	1	40	32	0	7	7.000	11	0	5.0
	85~90	5	90	80	0	5	1.000	6	0	5.0

## 3 偏分形扫描策略

图2中LPWM法虽可从理论上消除DFC,但是在实现高灰度级时存在大量的时间冗余,传输效率极低。

分形扫描(Fractal Scan,FS)<sup>[13-14]</sup>传输过程中无时间冗余,数据传输效率可达到100%,因此可将线性脉宽调制法和分形扫描法结合起来,形成偏分形扫描法。对于特定的子场编码,DFC主要是由于高权值子场与相邻子场的权值相差过大,因此把高权值子场分割成若干个权值相等的低权值子场,这些子场对应的像素数据采用高数据位LPWM法实现。对于权值较小的子场,低数据位FS法实现,使传输效率达到100%。

根据灰度数据位实现方式的不同,将输入的数据位划分为LPWM数据位和FS数据位。假设每个像素用N bit表示灰度值,其中S bit用LPWM法表示,(N-S) bit用FS法表示。对于LPWM数据位,由于原有的数据位数不足以用来显示灰度,需将S位扩展为 $(2^S - 1)$ 位。图5(a)是N=8,S=4时的偏分形扫描矩阵,将红框内的4位分形矩阵的子空间数量由4个扩展为16个,与LPWM法结合,生成偏分形的矩阵Q。图5(b)是偏分形的扫描时空图,横坐标为扫描时间,单位为扫描一个子空间的时间ST,纵坐标表示子空间。传输LPWM数据需要240个ST,按照分形结构传输FS数据需要64个ST。在传输FS数据时需要清除其余子空间的LPWM数据,4bit分形扫描结束后也需要进行清行操作,该操作虽不影响其它子空间的传输,但是会有部分亮度损失,表2为其与其它扫描策略的扫描性能的对比,在保证较高扫描性能的前提下可改善DFC现象。

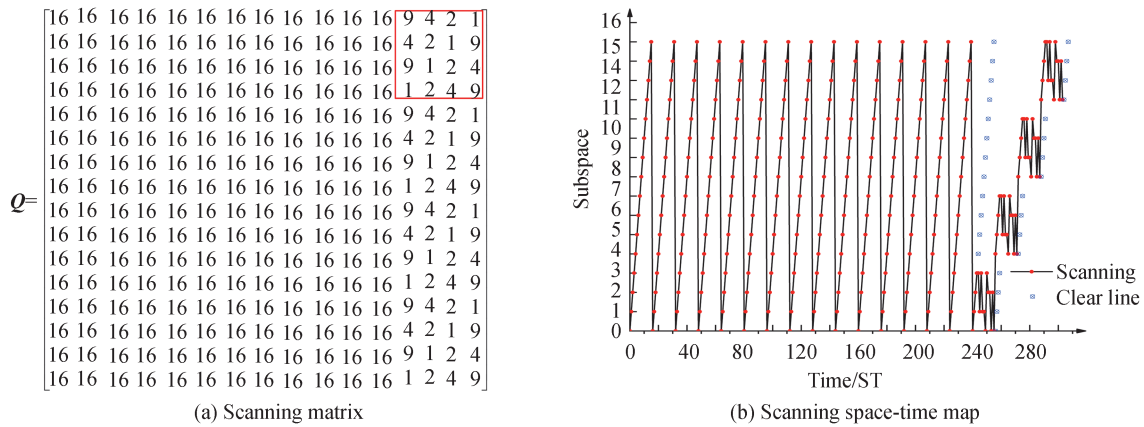


图5 偏分形扫描策略(S=4)  
Fig. 5 Partial fractal scanning strategy (S=4)

表2 不同扫描方法的扫描性能比较

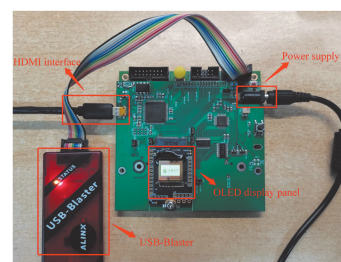
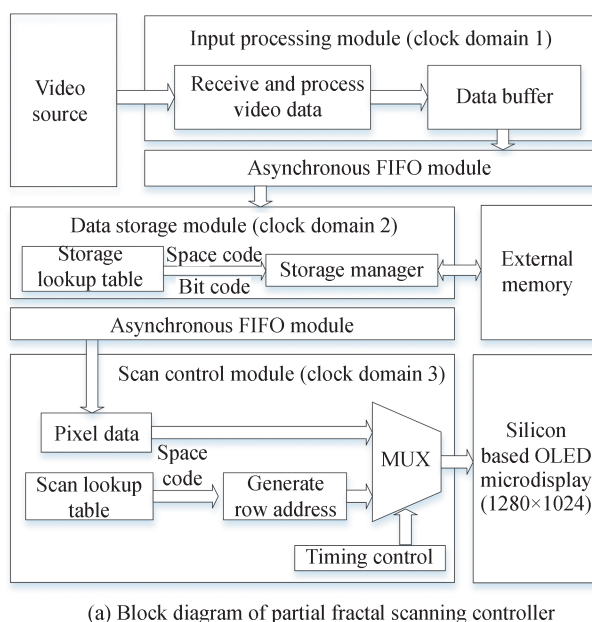
Table 2 Comparison of scanning performance of different scanning methods

Scanning method	Transmission efficiency	Lighting efficiency	Grayscale efficiency	Linearity
12-subframe	66.67%	66.41%	100%	100%
19-subframe	42.11%	83.88%	100%	100%
Fractal (9:4:2:1)	100%	100%	94.14%	94.14%
Partial fractal (9:4:2:1)	100%	84.21%	94.14%	94.14%
Partial fractal (8:4:2:1)	100%	83.88%	100%	100%

针对偏分形扫描存在着权值非线性和灰度级缺失的问题,可在扫描控制器中利用清行信号,提前一个ST时间对bit3的数据进行清行处理,调节非线性权值的点亮时间,使bit3对应的权值由9变为8,在牺牲部分有效发光效率的前提下,使灰度数据的线性度提高,可实现256级灰度显示,增加了图像色彩的丰富度。

本文在分辨率为1280×1024的单色硅基OLED微显示器进行了硬件系统验证,偏分形扫描控制器系统框图如图6(a),偏分形扫描控制模块主要包含输入处理模块、数据存储模块和扫描控制模块,每个模块都处在不同的时钟域,跨时钟域进行数据操作时需要经过异步FIFO的同步处理。输入处理模块将视频源输入的像素数据重新扩展排列来满足偏分形扫描策略的灰度值量化。数据存储模块通过建立存储查找表输出子空间码和位码,来控制外部存储器中像素数据的存储和输出。扫描控制模块输出控制时序和数据信号来驱动微显示器工作,完成偏分形的扫描。图6(b)、(c)为实验装置以及显示画面,采用图5(a)经过线性校正后的扫描权值序列,可将其简写为16(15):8:4:2:1,当显示刷新率为120 Hz,人眼几乎观察不到DFC现

象,验证了该扫描策略在 OLED 微显示器的应用。



(b) Diagram of experimental device



(c) Display renderings

图 6 偏分形扫描系统验证

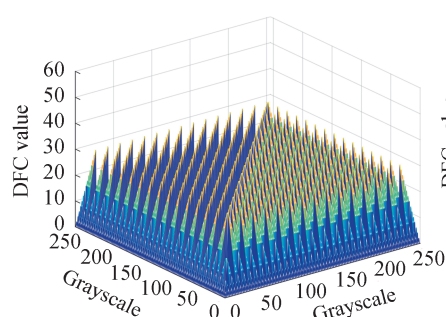
Fig. 6 Partial fractal scanning system verification

## 4 实验结果分析

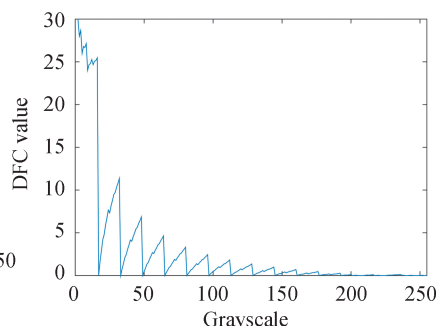
通过仿真比较 JND 积分法相比其余评估方法的优越性,并用 JND 积分法对不同  $S$  值的偏分形扫描进行评估。用 PSNR 对柯达标准图像库 ISO12640-2<sup>[15]</sup> 中的 24 幅包含不同特征信息的原始图像进行分析,结果取 24 幅图的均值。

### 4.1 不同评估方法 DFC 量化结果对比

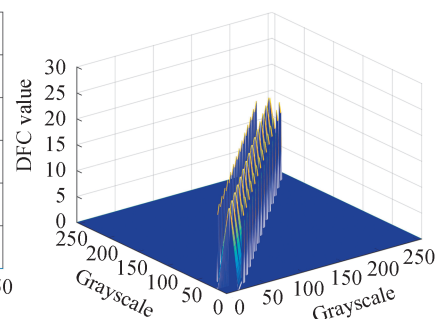
图 7(a)~(e)分别为用距离法、相对比值法、动态积分法(只计算灰度差小于 20)、动态积分法(计算任意灰度差)、JND 积分法对  $N=8, S=4$  时的偏分形扫描策略进行评估。只要扫描序列的权值大小不变,距离法的评估结果都为图 7(a)。相对比值法的评估结果为平面图,DFC 量化值随灰度级的增大整体有下降的趋势。以上两种方法都没有从 DFC 产生机理出发,所以评估并不准确。动态积分法从 DFC 产生机理出发,由于不同灰度差对 DFC 的影响不同,所以不能只计算灰度差小于 20 的情况。图 7(d)中用动态积分法计算任意灰度差,灰度级 15 到 16 与灰度级 95 到 192 之间的 DFC 量化值都为 15。但是在实际观察中,人眼能明显地感受到 15 到 16 灰度级之间的 DFC,却基本感受不到 95 到 192 灰度级之间的 DFC,用本文提出的 JND 积分法则能准确地反映人眼的感知。



(a) Distance method



(b) Relative ratio method



(c) Dynamic integral method (less than 20)

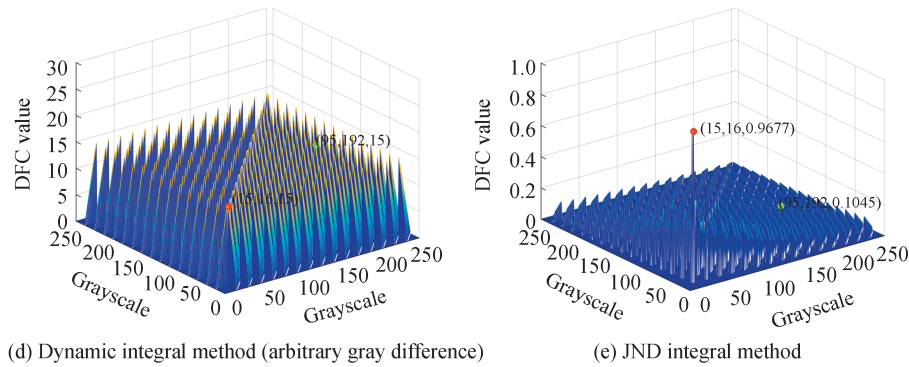


图7 不同评估方法的评测结果比较

Fig. 7 Comparison of evaluation results of different evaluation methods

#### 4.2 偏分形的 DFC 量化结果

表3是用JND积分法对12子场,19子场,分形扫描(9:4:2:1),不同S值的偏分形扫描策略产生DFC大小的评估结果。子场数目的增多并不能改善DFC,分形扫描相对普通的子场法能有效改善DFC。偏分形随着S值的增大,即LPWM数据位数的增加,DFC的量化值逐渐减小,PSNR值逐渐增大,但是对显示屏数据传输时钟频率的要求越高。图8为不同S值的偏分形DFC仿真图像,当 $S=4$ 时,图像的显示效果已经非常接近原图像。

表3 不同扫描策略的DFC量化结果

Table 3 DFC quantization results of different scanning strategies

	Subfield coding sequence	Grayscale	DFC quantitative values			PSNR
			Sum	Ave	Max	
12-subframe	4:2:1:1/2:1/4:1/8:1/16:1/32	256	9 185.397	0.140	0.996	20.361 8
19-subframe	8:4:2:1:1/2:1/4:1/8:1/16	256	9 185.397	0.140	0.996	20.361 8
Fractal(9:4:2:1)	128:64:32:16:9:4:2:1	241	7 345.082	0.126	0.968	21.880 1
Partial fractal	64(3):30:15:8:4:2:1	244	5 164.182	0.087	0.992	24.931 1
	32(7):15:8:4:2:1	248	2 646.689	0.043	0.984	29.672 4
	16(15):9:4:2:1	241	965.043	0.017	0.968	35.222 2
	8(31):3:2:1	224	174.660	0.003	0.084	44.922 8

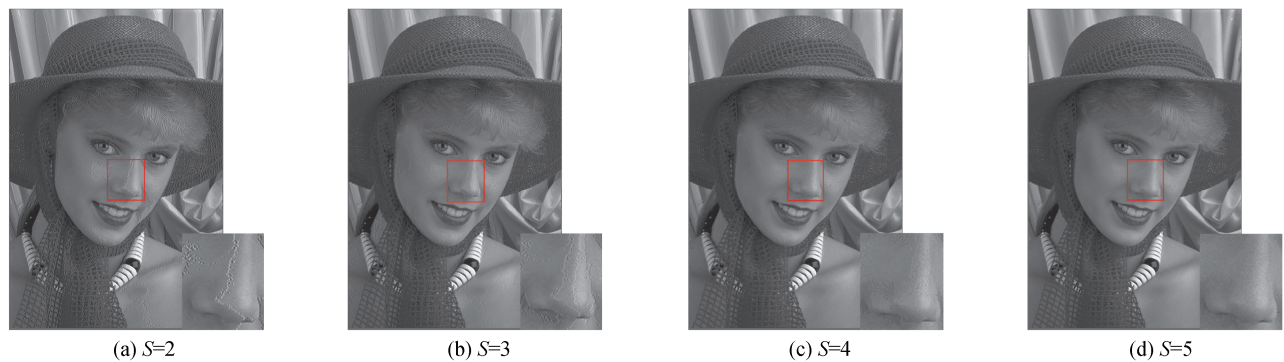


图8 不同S值的DFC仿真图像

Fig. 8 DFC simulation images with different S values

## 5 结论

针对数字驱动型 OLED 在显示运动画面时会出现 DFC 现象,本文根据产生 DFC 的原理,分析比较了现有 DFC 评估方法存在的问题。在动态积分法的基础上考虑了灰度差以及人眼的视觉特性,将评估标准归一化,提出了 JND 积分法。此外将 LPWM 法和 FS 法结合,提出了偏分形扫描策略来改善 DFC,通过使用所提

出的评估方法来定量分析和图像仿真,并在 $1280 \times 1024$ 的硅基OLED验证LPWM数据位数和FS数据位数都为4bit的偏分形扫描策略,有效说明了偏分形可以改善DFC现象。该扫描策略为改善数字驱动OLED在显示运动画面时出现的DFC现象提供了一种解决方案。

### 参考文献

- [1] JI Yuan, YU Yunsen, GAO Qin, et al. System of OLED-on-silicon micro display based on visual perception of human eye [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(4): 0411001.  
季渊, 余云森, 高钦, 等. 基于人眼视觉特性的硅基OLED微显示器系统[J]. *光子学报*, 2019, 48(4): 0411001.
- [2] GHOSH A, DONOGHUE E P, KHAYRULLIN I, et al. Ultra-high-brightness 2K $\times$ 2K full-color OLED microdisplay using direct patterning of OLED emitters[J]. *Proceedings of the SID*, 2017, 48(1): 226-229.
- [3] QIN Changbing, CHEN Qihong, CHEN Tingting, et al. Design of a PWM circuit for silicon-based OLED driving chip [J]. *Optoelectronic Technology*, 2020, 40(1): 44-51.  
秦昌兵, 陈啟宏, 陈亭亭, 等. 一种基于硅基OLED驱动芯片的PWM电路设计[J]. *光电子技术*, 2020, 40(1): 44-51.
- [4] ZHANG Xiaoning, LIU Chunliang. Relative ratio method for evaluating DFC in color PDPs[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2006, 21(2): 119-123.  
张小宁, 刘纯亮. 彩色PDP动态假轮廓的评测方法——相对比值法[J]. *液晶与显示*, 2006, 21(2): 119-123.
- [5] SHI Tieling, LIANG Zhihu, WEI Wei, et al. Dynamic integral method for evaluating dynamic false contours of motion images in color plasma display panels[J]. *Vacuum Science and Technology*, 2003, 23(3): 156-160.  
石铁岭, 梁志虎, 魏巍, 等. 彩色PDP运动图像动态假轮廓的评测方法——动态积分法[J]. *真空科学与技术*, 2003, 23(3): 156-160.
- [6] XU Beilei, ZHUANG Yiqi. Sub-field sequence optimization for plasma displays based on weight-modulated sub-field histogram[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2005, 51(4): 1248-1252.
- [7] ZHOU Xiaoyuan, YUAN Shengchun, LI Hui, et al. A Novel of pulse width modulation for eliminating the dynamic false contour in LED display[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(2): 0223002.  
周筱媛, 袁胜春, 李慧, 等. 一种消除LED显示屏动态假轮廓的脉宽调制法[J]. *光子学报*, 2015, 44(2): 0223002.
- [8] HUANG J F, ZHANG X N, WANG Y G. Adaptive unsymmetrical dither region to improve dynamic false contour in PDPs[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2010, 56(4): 2027-2031.
- [9] WEI W, YUAN X L. A time-split method for dynamic false contour of motion images in color plasma display panel[C]. *IEEE Computer Society*, 2010: 145-148.
- [10] YANG X K, LING W S, LU Z K, et al. Just noticeable distortion model and its applications in video coding[J]. *Signal Processing Image Communication*, 2005, 20(7): 662-680.
- [11] WALLS F G, MACLNNIS A S. VESA display stream compression for television and cinema application [J]. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuit and Systems*, 2016, 6(4): 460-470.
- [12] ITU-R/BT. 500-11, Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures [S]. Geneva: International Telecommunications Union, 2002.
- [13] XU Meihua, CHEN Zhangjin, RAN Feng, et al. Optimal scanning architecture and fractal model for flat panel display system[J]. *Acta Electronic Sinica*, 2006, 34(8): 1376-1380.  
徐美华, 陈章进, 冉峰, 等. 平板显示系统的最优扫描结构及分形模型[J]. *电子学报*, 2006, 34(8): 1376-1380.
- [14] CHEN W D, JI Y, MU T Z, et al. Atomized scan method for high-definition silicon-based OLED microdisplays [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2020, 67(10): 4293-4299.
- [15] KODAK. Kodak lossless true color image suite. ISO12640-2[EB/OL]. Available: <http://r0k.us/graphics/kodak>.