

# RGB-Delta 结构 AMOLED 子像素渲染算法的研究

马奔<sup>1</sup>, 杨文华<sup>1</sup>, 尹勇生<sup>1\*</sup>, 贾晨<sup>2</sup>, 宇跃峰<sup>1</sup>

<sup>1</sup>合肥工业大学微电子设计研究所教育部 IC 设计网上合作研究中心, 安徽 合肥 230009;

<sup>2</sup>深圳清华大学研究院, 广东 深圳 518057

**摘要** 由于制造工艺的限制, RGB-Delta 结构主动阵列有机发光二极管 (AMOLED) 子像素排列不规则, 三基色子像素呈三角形分布, 且每个像素单元由两个子像素构成, 因此无法正常显示 RGB 图像。为了解决这一问题, 本文通过分析 RGB-Delta 结构 AMOLED 子像素排列的特点, 提出渲染单元内子像素的共用原则及方式, 计算某一子像素与共用子像素在原图像中对应的灰阶差值, 并提出基于阈值比较方法来计算最佳渲染权重系数, 从而由原图像的像素灰阶值权重和得到虚拟像素灰阶值。对算法进行随机图像测试, 结果表明, 处理后图像与原图像的均方误差平均值为  $4.68 \times 10^{-5}$ , 峰值信噪比平均值为 40.45 dB。同时还对该算法进行了点屏显示验证, 测试内容包括文字、线条等高频图像。本文算法在色彩不失真和有效控制彩边效应的情况下, 较好地还原了图像信息。

**关键词** 成像系统; RGB-Delta 结构; 像素排列; 子像素渲染; 阈值比较; 权重系数

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.101106

## Research on RGB-Delta Structure AMOLED Sub-Pixel Rendering Algorithm

Ma Ben<sup>1</sup>, Yang Wenhua<sup>1</sup>, Yin Yongsheng<sup>1\*</sup>, Jia Chen<sup>2</sup>, Yu Yuefeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hefei University of Technology Institute of VLSI Design IC Design Web-cooperation Research Center of MOE, Hefei, Anhui 230009, China;

<sup>2</sup>Research Institute of Tsinghua University in Shenzhen, Shenzhen, Guangdong 518057, China

**Abstract** Due to the limitation of manufacturing technology, the sub-pixels of RGB-Delta structure active-matrix organic light emitting diode (AMOLED) are arranged irregularly, the trichrome sub-pixels are distributed as triangle, and each pixel unit is composed of two sub-pixels, so the RGB image cannot be displayed normally. In order to solve this problem, by analyzing the arrangement characteristics of sub-pixels in RGB-Delta structure AMOLED, this paper proposes the sharing principle and method of the sub-pixels in rendering unit, and calculates the gray-scale difference between a sub-pixel and a shared sub-pixel in the original image. A method based on threshold comparison is proposed to calculate the optimal rendering weight coefficient, and the virtual pixel grayscale value is obtained by summing the pixel gray-scale value weights of the original image. Random image tests show that the mean square error of the processed image and original image is  $4.68 \times 10^{-5}$ , and the mean peak signal-to-noise ratio is 40.45 dB. At the same time, the algorithm is verified by point screen display, including high-frequency images such as text and line. The proposed algorithm can restore the image information without distortion and effectively control the color edge influence.

**Key words** imaging systems; RGB-Delta structure; pixel arrangement; sub-pixel rendering; threshold comparison; weight coefficient

**OCIS codes** 110.3010; 100.3020; 100.2000

收稿日期: 2019-09-04; 修回日期: 2019-10-13; 录用日期: 2019-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(61704043)、中央高校基本科研业务费专项资金(JD2016JGPY0003)、深圳市科创委技术攻关项目(JSJG20170413153845042)

\* E-mail: yinyongsheng@hfut.edu.cn

# 1 引言

随着显示技术的快速发展,主动阵列有机发光二极管(AMOLED)凭借其色域宽、亮度高、柔韧性好等特点,逐渐取代液晶显示器(LCD)成为下一代关键显示技术。液晶显示器利用背光源被动发光,通过滤光片实现 RGB 色彩,制作工艺简单,成本较低,且 RGB 子像素采用条纹排列方式,每一个像素都可以独立显示不同的颜色。而 AMOLED 的 RGB 子像素由红、绿、蓝自发光有机材料制作而成,尤其在当前智能显示设备大尺寸、高分辨率的发展趋势下,制造极小且高密度的 AMOLED 较为困难,成本较高,同时也增加了驱动电路的设计难度。因此,各大显示面板厂商开始通过改变子像素排列结构和减少子像素数量的方式解决这一问题。

目前多数显示器的子像素排列结构为:RGB 条纹式结构、RGB-Pentile 结构和 RGB-Delta 结构等<sup>[1]</sup>。2012 年 5 月,三星在 Galaxy S3 手机上首次使用 RGB-Pentile 结构 AMOLED。为了进一步改善显示效果,三星将 RGB-Pentile 结构 AMOLED 改进为 RGB-Diamond 结构。由于专利原因,目前国内大多面板厂商只能生产 RGB-Delta 结构的 AMOLED。在 RGB-Delta 结构 AMOLED 中,RGB 三基色子像素呈三角形分布,每个像素单元由两个子像素构成。众所周知,全彩图像的像素是由 RGB 三色混成,若将图像某一像素的 R、G、B 灰阶值直接通过驱动电路在 RGB-Delta 结构面板上进行显示,则会出现子像素缺失、彩边效应和图像信息丢失等情况。因此,需要通过子像素渲染(SPR)算法规定显示面板子像素的共用方式,计算渲染权重系数,得到处理后的图像再通过驱动电路在面板上显示。子像素渲染算法大多集成在 AMOLED 驱动 IC 中,而三星等公司极少公布其子像素渲染核心技术。除此之外,国内有一些公开发表的论文介绍 RGB-Pentile 结构的 AMOLED 子像素渲染算法,很少有 RGB-Delta 结构 AMOLED 子像素渲染算法的相关文献<sup>[2]</sup>。

本文提出一种适用于 RGB-Delta 排列结构的 AMOLED 子像素渲染算法,能够有效解决上述图像数据无法在面板上正常显示的问题。通过研究和分析 RGB-Delta 结构 AMOLED 的子像素排列方式特点,提出渲染单元内子像素的共用方式,并创新性地以基于阈值比较的方式计算最佳渲染权重系数,原子像素灰阶值权重和后构成虚拟图像经由驱动

显示。经实验验证,本文算法在图像不失真和有效控制彩边效应的情况下,较好地还原了图像信息。

## 2 像素排列分析

一个像素通常被划分为多个子像素,每个子像素显示预定的颜色(通常为红色、绿色和蓝色),子像素的小几何结构使人眼能够将空间复用的颜色混合在一起,从而达到显示色彩的效果<sup>[3]</sup>。图 1 和图 2 是  $3 \times 3$  像素两种不同结构的排列图,规定其子像素下标为  $i-1, i, i+1$ ,其中  $i=2, 5, 8, \dots, N-4, N-1, N$  为图像中一行像素个数。图 1 为多数液晶显示器采用的条纹式 RGB 排列方式,每个像素包含完整的三基色子像素,且每行排列顺序相同。图 2 为 RGB-Delta 排列结构 AMOLED 面板示意图。其三基色子像素采用三角形排列方式,且单基色子像素数量比条纹式 RGB 排列各减少了  $1/3$ 。面板上每个像素单元仅由两个子像素构成且奇偶行排列顺序不同,这种均匀分布的排列方式既保证了视觉上分辨率的不下降,又能够减少显示面板驱动线的数量。同时,增大子像素的尺寸,能够降低制造工艺的难度,从而提高面板的生产良率。由图 2 可见,Delta 结构 AMOLED 中像素重复的最小单元为三个像素,因此定义三个像素为一渲染单元。图 3(a)

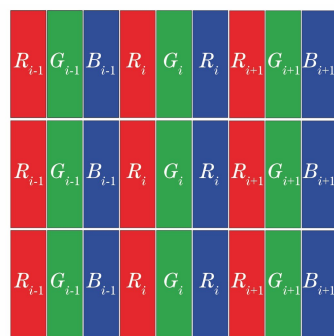


图 1 传统 RGB 排列结构图

Fig. 1 Traditional RGB permutation structure

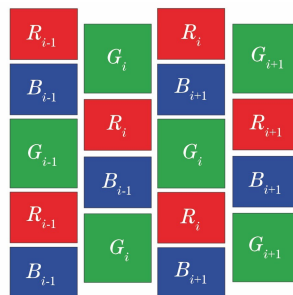


图 2 RGB-Delta 排列结构图

Fig. 2 RGB-Delta permutation structure

为奇数行渲染单元示意图,其第一像素为RB、第二像素为GR、第三像素为BG。图3(b)为偶数行渲染单元示意图,其第一像素为GB、第二像素为RG、第

三像素为BR。因此,本文将同时从奇数行和偶数行两个角度分别阐述子像素的共用方式及渲染权重系数的计算。

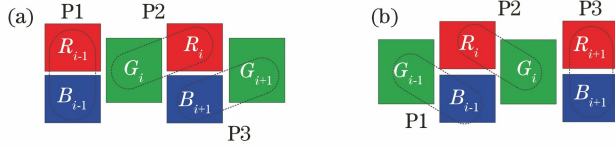


图3 渲染单元重复像素示意图。(a)奇数行;(b)偶数行

Fig. 3 Repeated pixels diagram of rendering unit. (a) Odd rows; (b) even rows

### 3 SPR 算法

#### 3.1 子像素借用方式

两个子像素构成的像素只能显示部分色彩,所以子像素渲染的算法的本质是通过渲染权重系数计算得到子像素灰阶值,并以子像素共用的方式构建新的像素呈现出亮度和色彩,最终在 Delta 排列 AMOLED 的面板上还原图像信息。由于新像素的三基色包含原像素中两个子像素及共用子像素,本文称之为虚拟像素,虚拟像素构成的图像称为虚拟图像<sup>[2]</sup>。

为了能够避免彩边效应和低频锯齿,较好地还原图像细节,尤其在显示线条及文字等图像信息时,保证垂直方向上像素显示的平滑视感,本文提出的子像素共用原则是某一像素在借用子像素后,构成的虚拟像素三基色子像素间距小,不会在物理位置上形成子像素偏移或像素拉长等情况,否则会影响人眼在空间复用后无法感知到正确的颜色,反而观察到彩边。

在 RGB-Delta 结构 AMOLED 中,由于子像素排列顺序不同,因此奇数行和偶数行每个像素的借用方式也不同。根据上述子像素的共用原则,在奇数行渲染单元内,像素  $R_{i-1}$ 、 $B_{i-1}$  需要借用右相邻  $G_i$  子像素以构成虚拟像素,像素  $G_i$ 、 $R_i$  借用右相邻  $B_{i+1}$  子像素,像素  $B_{i+1}$ 、 $G_{i+1}$  借用左相邻  $R_i$  子像素。而在偶数行渲染单元中像素  $G_{i-1}$ 、 $B_{i-1}$  借用右相邻  $R_i$  子像素以构成虚拟像素,像素  $R_i$ 、 $G_i$  借用左相邻  $B_{i-1}$  子像素,像素  $R_{i+1}$ 、 $B_{i+1}$  借用左相邻  $G_i$  子像素。

若奇数行和偶数行的子像素共用方式相同,则容易造成彩边效应。例如,在显示一条单像素大小的白色竖线时,即图4和图5传统排列中P1像素和P3像素灰阶值为0,P2像素灰阶值为255。那么在图4中,即RGB-Delta结构奇数行排列中对应的 $G_i$ 子像素、 $R_i$ 子像素需要借用 $B_{i+1}$ 子像素构成一个

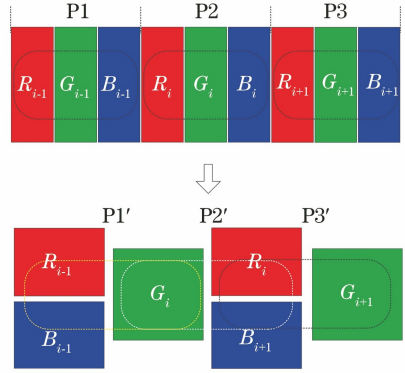


图4 奇数行子像素共用方式

Fig. 4 Common sub-pixel of odd row

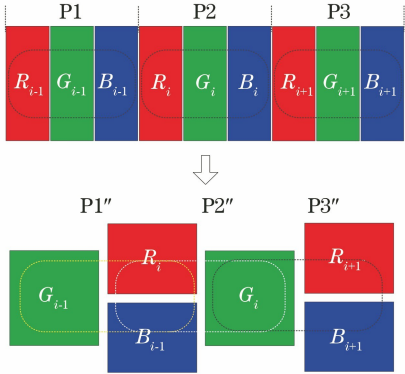


图5 偶数行子像素共用方式

Fig. 5 Common sub-pixel of even row

包含完整三基色的像素  $P2'$  才能正常显示一个白点。而在图5中,即偶数行排列中的  $R_i$  子像素和  $G_i$  子像素如果也借用  $B_{i+1}$  子像素,则会造成  $B_{i+1}$  蓝色子像素和  $R_i$  红色子像素物理位置偏离,形成蓝色彩边效应,即图6中第二行的  $B_{i+1}$  子像素。因此,偶数行的  $R_i$  子像素、 $G_i$  子像素需要借用  $B_{i-1}$  子像素构成虚拟像素  $P2''$ 。

#### 3.2 权重系数

子像素渲染算法的权重系数设为固定值时可以减小算法实现的复杂度,降低硬件消耗,但同时会降低重建图像的质量,无法很好地显示图像细节<sup>[2-3]</sup>。为了能够在显示不同场景图像的同时尽可能地保留

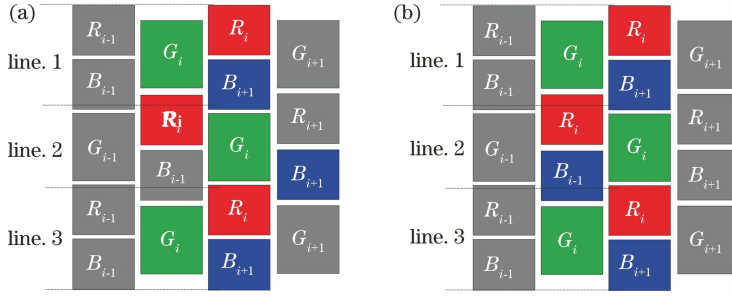


图 6 子像素彩边效应示意图。(a)彩边效应;(b)无彩边效应

Fig. 6 Schematic of sub-pixel color edge influence. (a) Color edge influence; (b) without color edge influence

图像细节,本文提出基于阈值比较的子像素渲染权重系数计算方式。首先计算某一子像素与共用子像素在原图像中对应的灰阶差值,与设定的阈值作比较,高于设定阈值和低于设定阈值所求得的权重系数不同,从而得到不定的共用子像素灰阶值,更好地渲染图像细节。

在 0~255 所表示的图像灰度显示系统中,灰度级数为 8、16、32 时的人眼正确识别率分别约为 93.16%、68.75%、45.31%<sup>[4]</sup>。在将灰阶范围 32 等分后,低于灰阶值 8,人眼识别到的图像接近于黑色,而高于灰阶值 248,人眼识别图像接近纯白色,RGB 单色显示时同理,因此本文选取的阈值  $X=248$ 。针对面板生产工艺的不同,可能会出现相同颜色子像素

颗粒发光亮度不均,色域不同等。因此算法在硬件实现时阈值应为可调值,便于测试使用,使本文算法在不同工艺下的面板上都能很好地显示图像。

选取阈值后,计算当前子像素与需要被借用子像素在原图像中对应的灰阶差值,若差值大于所设定的阈值  $X$ ,则共用子像素的灰阶值由一权重系数与被借用子像素原灰阶值计算得;若差值小于或等于设定的阈值  $X$ ,则共用子像素的灰阶值由另一权重系数与该子像素及被借用子像素的原灰阶值共同计算所得。结合上文对渲染单元内子像素共用方式的分析结果,得到奇数行渲染单元子像素渲染算法公式和偶数行渲染单元子像素渲染算法公式,分别为

$$\left\{ \begin{array}{l} R'_{i-1} = R_{i-1} \\ B'_{i-1} = B_{i-1} \\ G'_i = \begin{cases} \alpha \times G_i, G_i - G_{i-1} > X \\ \alpha_1 \times G_i + (1 - \alpha_1) \times G_{i-1}, G_i - G_{i-1} \leq X \end{cases} \\ R'_i = \begin{cases} \beta \times R_i, R_i - R_{i+1} > X \\ \beta_1 \times R_i + (1 - \beta_1) \times R_{i+1}, R_i - R_{i+1} \leq X \end{cases} \\ B'_{i+1} = \begin{cases} \theta \times B_i, B_i - B_{i+1} > X \\ \theta_1 \times B_{i+1} + (1 - \theta_1) \times B_i, B_i - B_{i+1} \leq X \end{cases} \\ G'_{i+1} = G_{i+1} \end{array} \right. , \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} G''_{i-1} = G_{i-1} \\ B''_{i-1} = \begin{cases} \lambda \times B_i, B_i - B_{i-1} > X \\ \lambda_2 \times B_{i-1} + (1 - \lambda_2) \times B_i, B_i - B_{i-1} \leq X \end{cases} \\ R''_i = \begin{cases} \eta \times R_i, R_i - R_{i-1} > X \\ \eta_1 \times R_i + (1 - \eta_1) \times R_{i-1}, R_i - R_{i-1} \leq X \end{cases} \\ G''_i = \begin{cases} \mu \times G_i, G_i - G_{i-1} > X \\ \mu_1 \times G_i + (1 - \mu_1) \times G_{i-1}, G_i - G_{i-1} \leq X \end{cases} \\ B''_{i+1} = B_{i+1} \\ R''_{i+1} = R_{i+1} \end{array} \right. , \quad (2)$$

式中:  $X=248$ ;  $0 \leq \alpha, \alpha_1, \beta, \beta_1, \theta, \theta_1 \leq 1$ ;  $0 \leq \lambda, \lambda_1, \eta, \eta_1, \mu, \mu_1 \leq 1$ 。  $R_{i-1}, G_{i-1}, B_{i-1}$  分别表示原图像中第  $i-1$  个像素中三基色的灰阶值;  $R_i, G_i, B_i$  表示原图像中第  $i$  个像素中三基色的灰阶值;  $R_{i+1}, G_{i+1}, B_{i+1}$  表示原图像中第  $i+1$  个像素中三基色的灰阶值。(1)式中  $R'_{i-1}, B'_{i-1}, G'_i$  表示虚拟图像奇数行第  $i-1$  个像素中三基色的灰阶值;  $R'_i, B'_{i+1}, G'_i$  表示虚拟图像奇数行第  $i$  个像素中三基色的灰阶值;  $R'_i, B'_{i+1}, G'_{i+1}$  表示虚拟图像奇数行第  $i+1$  个像素中三基色的灰阶值。(2)式中  $R''_i, G''_{i-1}, B''_{i-1}$  表示虚拟图

像偶数行第  $i-1$  个像素中三基色的灰阶值;  $R''_i, G''_i, B''_{i-1}$  表示虚拟图像偶数行第  $i$  个像素中三基色的灰阶值;  $R''_{i+1}, B''_{i+1}, G'_i$  表示虚拟图像偶数行第  $i+1$  个像素中三基色的灰阶值。

当子像素与被借用子像素的差值大于阈值时,表示两者的灰阶值分别在  $(0, 8)$  和  $(248, 255)$  区间内,可以理解为一个子像素亮和一个子像素不亮,人眼能够很好地区分两者。同时为了易于硬件设计,上述公式中差值大于阈值  $X$  的子像素渲染权重系数可直接设为 1,可得公式如下,

$$\left\{ \begin{array}{l} R'_{i-1} = R_{i-1} \\ B'_{i-1} = B_{i-1} \\ G'_i = \begin{cases} G_i, G_i - G_{i-1} > X \\ \alpha_1 \times G_i + (1 - \alpha_1) \times G_{i-1}, G_i - G_{i-1} \leq X \end{cases} \\ R'_i = \begin{cases} R_i, R_i - R_{i+1} > X \\ \beta_1 \times R_i + (1 - \beta_1) \times R_{i+1}, R_i - R_{i+1} \leq X \end{cases} \\ B'_{i+1} = \begin{cases} B_i, B_i - B_{i+1} > X \\ \theta_1 \times B_{i+1} + (1 - \theta_1) \times B_i, B_i - B_{i+1} \leq X \end{cases} \\ G'_{i+1} = G_{i+1} \end{array} \right. , \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} G''_{i-1} = G_{i-1} \\ B''_{i-1} = \begin{cases} B_i, B_i - B_{i-1} > X \\ \lambda_1 \times B_{i-1} + (1 - \lambda_1) \times B_i, B_i - B_{i-1} \leq X \end{cases} \\ R''_i = \begin{cases} R_i, R_i - R_{i-1} > X \\ \eta_1 \times R_i + (1 - \eta_1) \times R_{i-1}, R_i - R_{i-1} \leq X \end{cases} \\ G''_i = \begin{cases} G_i, G_i - G_{i-1} > X \\ \mu_1 \times G_i + (1 - \mu_1) \times G_{i-1}, G_i - G_{i-1} \leq X \end{cases} \\ B''_{i+1} = B_{i+1} \\ R''_{i+1} = R_{i+1} \end{array} \right. , \quad (4)$$

式中:  $X=248$ ;  $0 \leq \alpha_1, \beta_1, \theta_1 \leq 1$ ;  $0 \leq \lambda_1, \eta_1, \mu_1 \leq 1$ 。

当子像素与被借用子像素的差值小于或等于阈值  $X$  时,为了得到合适的权重系数,本文从图像差异的方向进行计算。而原图像与虚拟图像的灰阶差异可以用误差平方和(SE)表示,SE 越小,则表示处理后的图像灰阶与原图像灰阶越接近<sup>[2]</sup>。因此,SE 一阶偏微分等于零即 SE 最小时的权重系数为最佳权重值。奇数行和偶数行的 SE 表达式分别为

$$S_{SE'} = \sum_{i=2, i=i+3}^{N-1} (R_{i-1} - R'_{i-1})^2 + (G_{i-1} - G'_i)^2 + (B_{i-1} - B'_{i-1})^2 + (R_i - R'_i)^2 + (G_i - G'_i)^2 + (B_i - B'_{i+1})^2 + (R_{i+1} - R'_i)^2 + (G_{i+1} - G'_{i+1})^2 + (B_{i+1} - B'_{i+1})^2, \quad (5)$$

$$S_{SE''} = \sum_{i=2, i=i+3}^{N-1} (R_{i-1} - R''_i)^2 + (G_{i-1} - G''_{i-1})^2 + (B_{i-1} - B''_{i-1})^2 + (R_i - R''_i)^2 + (G_i - G''_i)^2 + (B_i - B''_{i-1})^2 + (R_{i+1} - R_{i+1})^2 + (G_{i+1} - G''_i)^2 + (B_{i+1} - B''_{i+1})^2. \quad (6)$$

结合(3)、(4)式,将虚拟图像子像素代入(5)、(6)式求一阶偏微分应该为零,表示为

$$\partial S_{SE'} / \partial \alpha_1 = 0, \partial S_{SE'} / \partial \beta_1 = 0, \partial S_{SE'} / \partial \theta_1 = 0, \quad (7)$$

$$\partial S_{SE''} / \partial \lambda_1 = 0, \partial S_{SE''} / \partial \mu_1 = 0, \partial S_{SE''} / \partial \eta_1 = 0. \quad (8)$$

求得权重系数为



$$\alpha_1 = \beta_1 = \theta_1 = \lambda_1 = \eta_1 = \mu_1 = 0.5. \quad (9)$$

结合(5)、(6)、(9)式,得到 RGB-Delta 结构 AMOLED 子像素渲染算法公式为

$$\left\{ \begin{array}{l} R'_{i-1} = R_{i-1} \\ B'_{i-1} = B_{i-1} \\ G'_i = \begin{cases} G_i, G_i - G_{i-1} > X \\ 0.5 \times G_i + 0.5 \times G_{i-1}, G_i - G_{i-1} \leq X \end{cases} \\ R'_i = \begin{cases} R_i, R_i - R_{i+1} > X \\ 0.5 \times R_i + 0.5 \times R_{i+1}, R_i - R_{i+1} \leq X \end{cases} \\ B'_{i+1} = \begin{cases} B_i, B_i - B_{i+1} > X \\ 0.5 \times B_{i+1} + 0.5 \times B_i, B_i - B_{i+1} \leq X \end{cases} \\ G'_{i+1} = G_{i+1} \end{array} \right. , \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} G''_{i-1} = G_{i-1}, \\ B''_{i-1} = \begin{cases} B_i, B_i - B_{i-1} > X \\ 0.5 \times B_{i-1} + 0.5 \times B_i, B_i - B_{i-1} \leq X \end{cases} \\ R''_i = \begin{cases} R_i, R_i - R_{i-1} > X \\ 0.5 \times R_i + 0.5 \times R_{i-1}, R_i - R_{i-1} \leq X \end{cases} \\ G''_i = \begin{cases} G_i, G_i - G_{i-1} > X \\ 0.5 \times G_i + 0.5 \times G_{i-1}, G_i - G_{i-1} \leq X \end{cases} \\ B''_{i+1} = B_{i+1} \\ R''_{i+1} = R_{i+1} \end{array} \right. . \quad (11)$$

由于 RGB-Delta 结构 AMOLED 子像素排列的特殊性,垂直方向上借用子像素容易造成像素拉长,从而容易导致彩边效应,违背上文提出的子像素借用原则。因此,本文算法在垂直方向上不存在子像素共用。

## 4 算法评估

### 4.1 客观评价

峰值信噪比(PSNR)通常用于评估经算法处理后重建图像的质量,PSNR 值越大,代表重建图像相对于原图失真越少,且图像质量越好。均方误差(MSE)越小,图像处理效果越好。当然,这只是常用的客观指标,实际的评价也包括主观的指标,但是主观的东西比较模糊,不同的人可能感觉有些不同<sup>[5]</sup>。

$$E_{\text{MSE}} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f(i, j) - f'(i, j)]^2}{M \times N}, \quad (12)$$

式中: $f(i, j)$ 表示原图像中某像素的灰阶值; $f'(i, j)$ 表示虚拟图像中相应像素的灰阶值; $M \times N$ 表示像素数量。

$$R_{\text{PSNR}} = 10 \times \log \frac{Q^2}{E_{\text{MSE}}}, \quad (13)$$

式中: $Q$ 表示灰阶数;PSNR 的单位为 dB。

为了尽可能客观评估算法的性能,同时考虑到 AMOLED 尺寸的多样性及日常使用显示时图像的多变性,本文随机选取四组不同分辨率大小的自然图像进行测试(图 7),图像具有随机性和普适性,且相同分辨率的两幅图像内容不同。对原图像和虚拟图像做对比,利用(12)、(13)式求得结果如表 1 所示。

表 1 8 组不同尺寸图像的测试结果

Table 1 Test results of several groups of pictures with different sizes

Image	Size /(pixel×pixel)	MSE/ $10^{-5}$	PSNR /dB
Fig. 7(a)	512×512	4.97	33.00
Fig. 7(b)	512×512	2.25	46.44
Fig. 7(c)	480×720	4.31	33.61
Fig. 7(d)	480×720	7.44	31.25
Fig. 7(e)	1080×1960	2.11	46.72
Fig. 7(f)	1080×1960	5.26	42.76
Fig. 7(g)	1080×2160	9.99	39.72
Fig. 7(h)	1080×2160	1.07	50.11
Mean	-	4.68	40.45

表 1 中随机测试图像的 MSE 均值为  $4.68 \times 10^{-5}$ , PSNR 均值为 40.45 dB。通常来说,较为普遍的自然图像 PSNR 值大于 28 时,图像质量差异不太显著,当大于 40 时,则肉眼分辨不出差异。此时,人眼对于图像的失真也是不易察觉的<sup>[6]</sup>。因此,

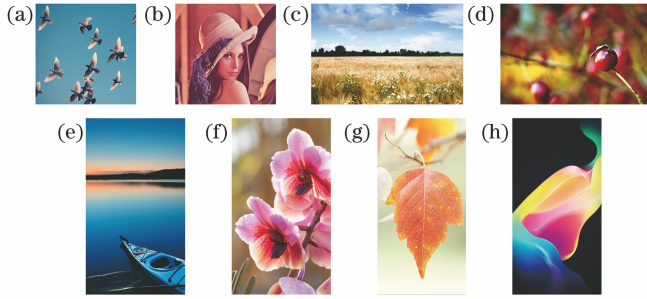


图 7 随机选取的图像

Fig. 7 Randomly selected images

从客观验证数据来看,处理后得到的重建图像能够正确还原图像信息。

#### 4.2 显示评估

虽然 4.1 节中算法测试结果良好,但是由于本文研究的内容应用性较强,且各大公司的核心算法极少公开,所以很难与其他类似算法作客观对比。同时,在实际应用过程中,PSNR 有时反映图像质量与人眼观察的图像质量情况并不完全相符,有可能 PSNR 较高者看起来反而比 PSNR 较低者差。这是因为人眼的视觉对于误差的敏感度并不是绝对的,其感知结果会受到很多因素的影响产生变化,即 PSNR 并不能很好地表达人眼视觉感知特性<sup>[7-8]</sup>。

因此,为了能更好评估算法显示效果,借助面板厂商提供的 RGB-Delta 结构 AMOLED 显示模组和显示验证设备,对本文算法进行了实际点屏显示测试。测试内容包括:线条、文字、混色等高频图像<sup>[9-10]</sup>。

在 MATLAB 对原图像完成算法处理后,生成 24 位 BMP 格式处理后图像,并通过计算机读入图像信息。验证设备将读入后的图像子像素灰阶值矩阵逐一驱动到如图 8 所示的 RGB-Delta 结构 AMOLED 面板上显示。

图 9 为显示评估对比图像。图 9(a)为算法专



图 8 RGB-Delta 结构 AMOLED 模组  
Fig. 8 RGB-Delta AMOLED module

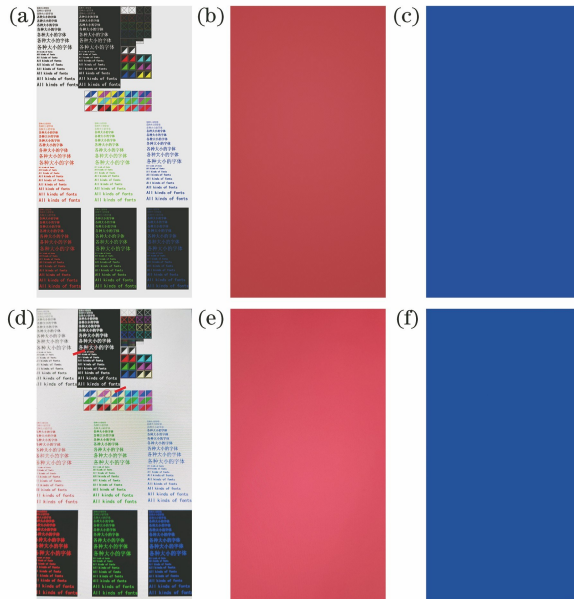


图 9 显示评估对比图像。(a)测试原图;(b)(c)高饱和色原图;(d)测试显示图;(e)(f)高饱和色显示图

Fig. 9 Display evaluation and contrast images. (a) Test original image; (b)(c) high saturation color image; (d) test display image; (e)(f) high saturation color display image

用测试原图,该图像中包含了各色文字、不同颜色的纯色图案以及高频线条等,适合测试 SPR 算法。图 9(b)、(c)为两幅高饱和色测试图。图 9(d)为图 9(a)显示结果拍摄图。可以看到,经算法处理后的图像,整体上显示效果较好,基本上保留了图像信息。图 9(e)、(f)为高饱和色显示图。显示图像能够正确还原色彩,但在饱和度上有所降低,其影响因素很多:1)图像平均处理时造成的图像饱和度降低;2)子像素发光材料工艺造成的屏幕色域差异;3)拍摄图像和人眼观察到的实际显示图有一定差别等<sup>[11-13]</sup>。

图 10 为图 9(d)中红色箭头标注处通过放大设

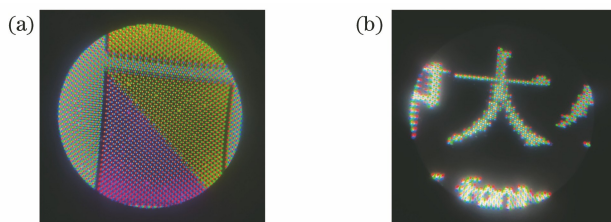


图 10 局部细节放大图像。(a)色彩细节图;(b)文字细节图

Fig. 10 Local detail enlarged image. (a) Color details image; (b) text details image

## 5 结 论

本文通过分析 RGB-Delta 结构 AMOLED 子像素排列特点,分析了彩边效应的形成原理,并提出三基色子像素共用成像的原则。以阈值比较的方式计算渲染权重系数从而得到虚拟图像的共用子像素灰阶值。本文从客观和主观两个方面对算法进行了验证,在实际点屏测试中,图像在不失真和有效控制彩边效应的情况下,较好地还原了原图信息,在 RGB-Delta 结构 AMOLED 驱动 IC 的应用上有较高的实用价值。此外,对于面板图像的显示评估过多地依赖视觉感官,没有找到合适的对比评价标准,在未来工作中需要进一步研究。

## 参 考 文 献

- [1] Feng J, Yan L M, Xia M Z. Sub-pixel rendering algorithm of improving image brightness [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(9): 091101. 冯俊, 严利民, 夏明治. 提高图像亮度的子像素着色算法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(9): 091101.
- [2] Huang C Q, You Y C, He J, et al. RGB to RGBG conversion algorithm based on weighting factors and related FPGA realization [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(7): 572-579. 黄成强, 杨友昌, 贺娟, 等. 基于权重因子的 RGB-

备后观察到的细节图。图 10(a)为色彩细节图,可以看到,本文算法在显示纯色图像时,没有明显的杂色,且不同色彩间没有严重的交叉显示,显示效果好。图 10(b)为文字细节图,主要用于观察彩边效应,可以看到,图中彩边效应控制良好,文字边缘显示清晰。此外,还对大量的自然图像进行了验证,均能正确还原图像信息,同时显示效果良好。目前,子像素渲染算法的显示评估多为主观评价,在研究过程中没有找到合适的定量评价标准。因此很难对裸屏显示后的图像进行定量评价<sup>[14-15]</sup>。这也是实验过程中有所欠缺的地方,未来会进行进一步研究。

RGBG 像素结构转换算法及其 FPGA 实现 [J]. *液晶与显示*, 2017, 32(7): 572-579.

- [3] Hirakawa K, Gu J. High resolution subpixel and subframe rendering for color flatpanel and projector displays [C] // 2011 18th IEEE International Conference on Image Processing, September 11-14, 2011. Brussels, Belgium. IEEE, 2011.
- [4] Xie W X, Qin A. The gray level resolution and intrinsic noise of human vision [J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 1991, 4(1): 51-55. 谢维信, 秦桢. 人的视觉对灰度级别的分辨能力及视觉内部噪声的研究 [J]. *航天医学与医学工程*, 1991, 4(1): 51-55.
- [5] Wu H Y. Research and implementation on a compression methodology based on line for video information by Matlab [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012. 吴红艳. 基于 Matlab 的视视频压缩算法研究和实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [6] Cao H. Research on image restoration algorithm based on single motion blurred image [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017. 曹慧. 基于单幅运动模糊图像复原算法研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- [7] Zhong G F. Research in color transfer between images [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2008.



- 钟高锋. 图像色彩迁移算法的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2008.
- [8] Zhao Y, Meng L R, Wang S G, et al. Improved PSNR evaluation method consistent with human visual perception [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2015, 45(1): 309-313.  
赵岩, 孟丽茹, 王世刚, 等. 符合人眼视觉感知特性的改进 PSNR 评价方法[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2015, 45(1): 309-313.
- [9] Ma X Y, Fan F Q, Lu T R, et al. Multi-exposure image fusion de-ghosting algorithm based on image block decomposition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 0910001.  
马夏一, 范方晴, 卢陶然, 等. 基于图像块分解的多曝光图像融合去鬼影算法[J]. *光学学报*, 2019, 39(9): 0910001.
- [10] Chen L, Tu Y, Wang L L, et al. Perceptual evaluation of sub-pixel rendering in a four-primary display system [C] // 2009 2nd International Congress on Image and Signal Processing, October 17-19, 2009. Tianjin, China. IEEE, 2009.
- [11] Sheedy J, Tai Y C, Subbaram M, et al. ClearType sub-pixel text rendering: Preference, legibility and reading performance [J]. *Displays*, 2008, 29(2): 138-151.
- [12] Chuang C F. Sub-pixel rendering method for Delta RGBW panel and Delta RGBW panel with sub-pixel rendering function: US20180240416 [P]. 2017-02-22.
- [13] Lüdemann J, Barnard A, Malan D F. Sub-pixel image registration on an embedded nanosatellite platform [J]. *Acta Astronautica*, 2019, 161: 293-303.
- [14] Lee B W, Song K, Yang Y, et al. 9. 2: implementation of RGBW color system in TFT-LCDs [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2004, 35(1): 111-113.
- [15] Huangfu L J, Li Z Z, Tan W J, et al. Analysis of luminance uniformity and relevant issues with virtual pixel display and countermeasures [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2019, 34(6): 556-563.  
皇甫鲁江, 李真真, 谭文静, 等. 虚拟像素显示均匀性及相关问题的分析和应对[J]. *液晶与显示*, 2019, 34(6): 556-563.