

# RGBW 子像素排列结构改进与色域映射优化算法

严利民\*, 王子铭

上海大学微电子研究与开发中心, 上海 200072

**摘要** 针对现有的以 RGBW 为主的多基色图像显示, 着重分析了 RGBW 子像素排列结构的工艺制造问题, 以及常见的 RGBW 排列结构显示成像时的诸多缺点, 并在此基础上提出一种新型的 RGBWRGB 子像素排列结构。在色域映射算法方面, 指出常见的 RGB 到 RGBW 的色域映射算法在面对复杂图像时的缺点, 并尝试在现有算法上进行改进以适配提出的新型子像素排列结构, 从而实现转换后图像色彩的还原和亮度的提升。

**关键词** 成像系统; 图像; 多基色显示; RGBW; RGBWRGB; 色域映射算法; 复杂图像

中图分类号 TN27

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.101102

## Improvement of RGBW Sub-Pixel Arrangement and Color Gamut Mapping Optimization Algorithm

Yan Limin\*, Wang Ziming

Microelectronics R&D Center, Shanghai University, Shanghai 200072, China

**Abstract** Aiming at the current RGBW-based multi-primary display, we analyze the manufacturing problems of RGBW sub-pixel arrangement and the shortcomings of common RGBW permutation on displaying images, and present a new RGBWRGB sub-pixel arrangement structure. We also analyze the shortcomings of common gamut mapping algorithms with RGB to RGBW in the face of complex images, and try to improve the algorithms to fit the proposed sub-pixel arrangement, while maintaining the color saturation of the displayed image and lifting the brightness.

**Key words** imaging systems; image; multi-primary display; RGBW; RGBWRGB; gamut mapping algorithm; complex image

**OCIS codes** 110.2960; 110.3000; 110.3010

## 1 引言

为解决传统 RGB 显示设备在亮度提升上的不足, 20 世纪就有公司提出在原有像素的基础上增加一个白色(W)子像素, 由于白色子像素不需要滤光片, 因此其透光率是其他子像素透光率的 3 倍<sup>[1]</sup>, 但是很快 RGBW 就销声匿迹了。这主要是由于传统的 RGB 数据信号需要进行处理才能在 RGBW 显示设备上显示, 但市面上并没有被广为认可的转换算法。而且加入白色子像素后会降低原图像的色彩饱和度, 导致一定程度的失真, 所以早年的 RGBW 显示设备所呈现的画面总带来一种被“稀释”的感觉。有工程师考虑通过减小白色子像素的面积来纠

正这个问题, 但这样又损失了来之不易的高亮度显示效果, 而且子像素面积的减小会大幅提升制造难度和成本。今日科技的发展和工艺的进步使得 RGBW 显示系统又有了可行性, 近年来很多公司提出了许多 RGBW 显示系统<sup>[2]</sup>。2011 年 4 月, Samsung(三星)与 Nouvoyance 在国际信息显示学会(SID)研讨会上联袂推出了全新一代 AMOLED 屏幕, 这一屏幕采用了 PenTile RGBW 显示技术, 屏幕分辨率达到了 2560 pixel×1600 pixel, 屏幕尺寸为 10.1 英寸(1 英寸=2.54 cm), 成为当时移动互联网设备上分辨率最高的屏幕。同年 8 月, 索尼宣布开发成功了 White Magic 显示屏, 同样为 RGBW 四基色显示系统。因此, RGBW 多基色显示已成为

收稿日期: 2018-03-15; 修回日期: 2018-04-26; 录用日期: 2018-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(61674100)、新型显示技术及应用集成教育部重点实验室开放课题(J.05-0418-18-202)

\* E-mail: yanlm@shu.edu.cn

业界研究的热点,如何提升显示效果是其中的关键技术之一。

本文在述评现有 RGBW 排列和显示系统中诸多不足和原因后,通过颜色椭圆宽容量模型和常见图像灰度分布等论证了 RGBW 的可行性,并在此之上提出一种新型的 RGBWRGB 子像素排列结构,通过改进现有的色域映射算法来适配新型排列结构,从而实现图像亮度的提高和原图像色彩的还原。

## 2 子像素排列结构

### 2.1 常见子像素排列结构

常见的条纹式 RGB 子像素排列如图 1(a)所示。常见的条纹式 RGBW 显示系统是在条纹式 RGB 的排列上进行更改的,在原有像素大小保持不变的基础上减少子像素大小,然后添加 W 子像素<sup>[3-4]</sup>,如图 1(b)所示。其他一些排列结构,如

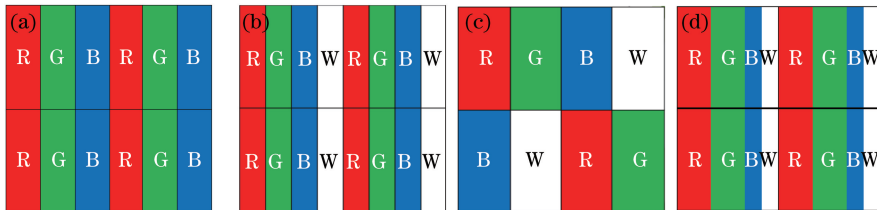


图 1 常见的子像素排列结构。(a)条纹式 RGB;(b)条纹式 RGBW;(c) Pentile RGBW;(d)特殊 RGBW

Fig. 1 Sub-pixel arrangement. (a)Stripe RGB; (b) stripe RGBW; (c) Pentile RGBW; (d) special RGBW

### 2.2 多基色显示可行性分析

由图像成色原理可知,白色子像素发出的光可以看成一定数量的等量红绿蓝像素的叠加,所以增加白色子像素对于扩大 CIE-xy 色度图上的色域三角形并无帮助<sup>[6-7]</sup>,但是白色的透光率是其他颜色透光率的 3 倍,所以同样亮度的白光由 W 子像素发出可让显示设备功耗降低。

常见的条纹式 RGBW 排列由于子像素面积减少,子像素的输入信号仍为 8 位 0~255 的电压信号,因此传统条纹式 RGBW 显示系统所呈现的图像相较于原 RGB 显示系统失真的可能原因如下:

1) 微观上子像素大小的减少导致 RGBW 系统在宏观显示上无法很好地还原高纯度色彩和高饱和度色彩;2) 人眼观察到的色彩是 RGB 三种子像素发出的光混合得到的色彩,白色子像素是特殊的子像素,会降低相邻的 RGB 子像素混合的色彩的纯度,造成引言中所述“稀释”的结果。

即便如此,RGBW 显示系统依然有其可行性。人们日常查看的图片或者视频都主要是由照相机、摄像机等采集设备得到的,大多数图像可以分为主

Pentile RGBW 排列,如图 1(c)所示,保持原有子像素大小不变(或变大),在显示时采用子像素借用的着色算法呈现图像。特殊 RGBW 排列结构如图 1(d)所示,让 RGB 中的 B 子像素减少一半,然后放置一个 W 子像素<sup>[5]</sup>。

Pentile RGBW 排列结构的优点是可以降低工艺制造难度,采用子像素“借”用的方式,通过低分辨率模拟高分辨率,但此种排列结构在显示文字边缘或斜线等细节的时候效果较差,在低分辨率的显示屏幕上锯齿严重。图 1(d)的排列基于的原理是人眼中对于蓝色的感光细胞较少,所以蓝色对于亮度的提高不明显,但是由于减少了 B 子像素的面积,此种排列不能使图片很好地达到白平衡效果,而且在显示蓝色主导的图像时失真严重。本文在设计 RGBW 排列结构时主要在图 1 所示的条纹式 RGBW 排列的基础上进行改进。

显示部分(人、动物、标志物等)和背景部分(天空、土地、河流等),采集设备在采集图像时会对图像做不同程度的虚化处理,造成主显示部分突出、背景部分淡化。分析影片中符合上述描述的图片的灰度直方图,如图 2 所示<sup>[8]</sup>。

由图 2 可知,常见图像中的高饱和度色彩在整体图片占比很少,而且根据麦克亚当的颜色椭圆宽容量范围<sup>[9-11]</sup>,如图 3 所示,人眼无法准确区分出一定范围内的色彩,且相较于蓝色主导的色彩,绿色或红色主导的色彩的颜色椭圆宽容量更大,所以对于原图像亮度提升的追求使 RGBW 系统的应用成为可能。

在条纹式 RGBW 排列结构中,考虑水平方向,一个 W 子像素可以被看作是临近左右两个由 RGB 组成的像素,影响左右两个像素的颜色饱和度。同样,也可以认为一组 RGB 像素在水平方向上主要被两个 W 子像素所影响。但常见的色域映射算法和着色算法中并未将其考虑进去,所以导致对应算法的实际显示效果比理论结果要差,产生“稀释”的结果<sup>[12]</sup>。

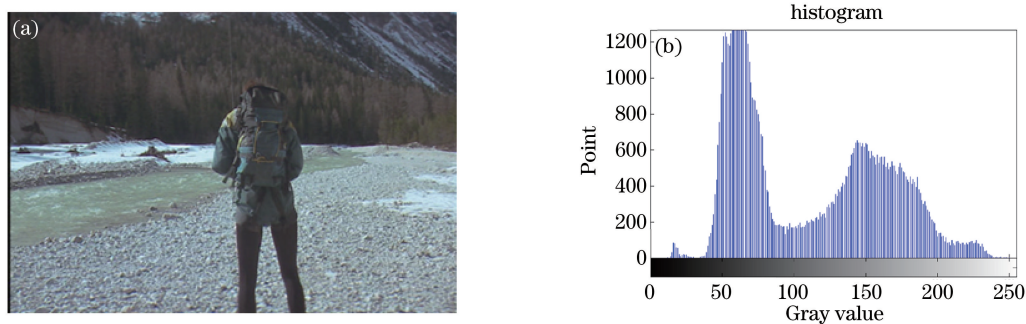


图 2 (a) 影片图像及(b)其灰度直方图

Fig. 2 (a) Film image and (b) its gray scale histogram

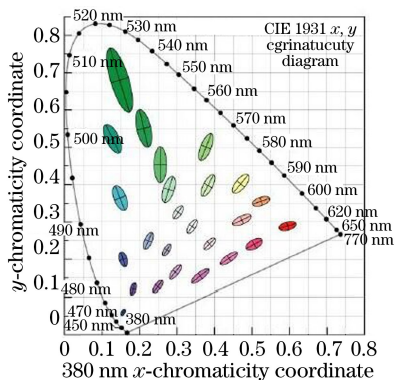


图 3 颜色椭圆宽容量范围

Fig. 3 Color ellipse wide capacity range

综上所述,本文提出新型 RGBWRGB 子像素排列结构,如图4所示,使用7个子像素来构成原来

同样大小的两个像素,其单个子像素面积比条纹式 RGBW 排列中的单个子像素面积大,所以相对于条纹式 RGBW 排列,其无法还原的高纯度色彩或高饱和度色彩的范围相对变小,而且降低了白色子像素对周围像素的“稀释”效果,从而提升了系统对于原图像的还原能力。在水平方向上,一组 RGB 像素可以认为仅受一个 W 子像素影响。在竖直方向上,使像素交错排列以避免 W 子像素全部都在同一列上,以此均匀 W 子像素对周围像素的影响。同时,R、G、B 子像素由于竖直方向上偏差较小,因此在显示竖线的时候并不会出现明显锯齿。尽管在此种排列情况下部分屏幕边缘像素会出现无法构成一组 RGBWRGB 像素的情况,但是对于屏幕整体显示效果并无影响。

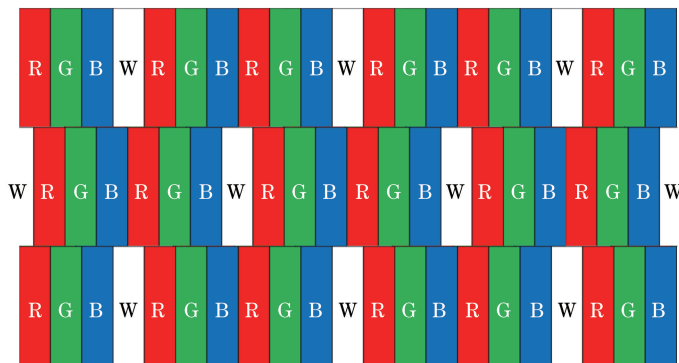


图 4 RGBWRGB 排列

Fig. 4 RGBWRGB arrangement

### 3 RGB 到 RGBW 的色域映射算法

实现 RGBW 系统转换算法的常用方案主要有两种:第一种是以 CIE 1931XYZ 系统为中介,采用数学计算的方式,将源 R、G、B 数据映射至 CIE 1931XYZ 系统后,通过逆映射实现目标  $R_w$ 、 $G_w$ 、 $B_w$ 、W 的数据信号计算,但此种方法对于硬件开销过大;第二种是首先确定白色分量,然后从源 R、G、

B 信号中减去一定的白色分量,得到目标  $R_w$ 、 $G_w$ 、 $B_w$ 、W 的数据。本文算法主要在后者基础上进行改进。

#### 3.1 常见算法方案

常见的算法方案采用直接提取白色分量的方式,利用 RGB 色域至 RGBW 色域色彩三属性不变的特点,得到  $R_w$ 、 $G_w$ 、 $B_w$ 、W 的计算公式。假设源 R、G、B 数据中最大值  $V_{max} = \max(R, G, B)$ 、最小

值  $V_{\min} = \min(R, G, B)$ , 常见的算法计算公式如下所示, 其中  $\alpha$  为非线性转换因子。

$$\begin{cases} W' = V_{\min} \\ M = \frac{V_{\min}}{V_{\max}} \\ W = f(W) = (W')^\alpha, (1 < \alpha < 2.5), \\ R_w = (1 + M)R - W \\ G_w = (1 + M)G - W \\ B_w = (1 + M)B - W \end{cases} \quad (1)$$

即  $R:G:B = (R_w + W):(G_w + W):(B_w + W)$ , 或者可以认为算法前后纯色与消色的比值不变, 由(1)式可以看出, 输入输出的基色比例保持相等, 因而输入输出的颜色色调和饱和度相同<sup>[13]</sup>。

此种方法实现简单, 硬件开销小, 但有以下缺点: 1) 该算法未对高纯度或高饱和度色彩进行补偿处理, 而且当源  $R, G, B$  中最小值较小时, 由于非线性转换因子的存在导致得到的  $W$  很小; 2) 对于源  $R, G, B$  中最大值与最小值相差较小的色彩, 即消色主导的色彩, 通过该算法转换后新的色彩相对于其他色彩亮度整体提升过大, 产生过曝的效果; 3) 算法中的非线性转换因子  $\alpha$  为一固定值, 对于不同的源  $R, G, B$ , 转换时对应的  $\alpha$  应该不同。

综上, 在现有的常见色域映射算法的基础上, 考虑到常见算法的不足, 对于不同色彩进行不同处理, 提出如下为适配 RGBWRGB 结构的色域映射算法。

### 3.2 改进算法

为改进常规算法的不足, 定义  $V_{\max}$  为一组  $R, G, B$  中灰度的最大值, 定义  $V_{\min}$  为最小值,  $M$  为最小值与最大值的比值, 将原始图像中的色彩源  $R, G, B$  分为如下三类: A 类,  $V_{\min} < 50$  且  $V_{\max} - V_{\min} > 100$ , 即高饱和度色彩和高纯度色彩; B 类,  $V_{\max} - V_{\min} < 30$  且  $V_{\min} > 80$ , 即低饱和度色彩和消色主导的色彩, 3.1 节的算法转换时会让这部分的色彩亮度提升过大, 产生过曝效果; C 类, 其他色彩。

对应 A、B、C 类色彩的改进算法描述如下。

A 类: 计算  $255/V_{\max}$  的比例系数  $X$ , 若  $X > 1.2$ , 则  $R_w, G_w, B_w$  为对应的源  $R, G, B$  乘以系数 1.2, 否则乘以比例系数  $X$ , 以此实现子像素面积减少后对于色彩失真的弥补, 并令  $W = (V_{\min})^\alpha$ ,  $1 < \alpha < 1.5$ 。

B 类: 为避免转换后的色彩过曝, 应减少经过 3.

1 节算法转换后  $R_w, G_w, B_w, W$  的数值, 公式描述如下。

$$\begin{cases} W' = V_{\min} \\ W = (W')^{\alpha_1} \\ M = \frac{V_{\min}}{V_{\max}} \\ R_w = (1 + M)R - (W')^{\alpha_2} \\ G_w = (1 + M)G - (W')^{\alpha_2} \\ B_w = (1 + M)B - (W')^{\alpha_2} \end{cases}, 1 < \alpha_2 < \alpha_1 < 2.5. \quad (2)$$

C 类: 同 3.1 节的常见算法。

### 3.3 着色处理

RGB 像素到 RGBW 像素的整体转换流程如图 5 所示, 在着色处理时, 两组 RGB 像素的组合有如下 6 种情况, 需要分别进行处理<sup>[14]</sup>。

1) AA, 即连续的高饱和度色彩, 令  $W = \max(W_{A1}, W_{A2})$ , 在一定程度上额外提升亮度, 并尽量让  $W$  不为 0, 以此保持呈现图像的连续性。

2) AB, 即高饱和度色彩和低饱和度色彩的交界处。A 类像素处理保持不变, 取  $W = W_A$ , 调整 B 类像素的色域映射算法, 增大  $\alpha_1$  使算法中间值  $W_B = W_A$ , 以得到新的 B 类像素色域映射算法的转换结果, 从而减少白色子像素对于 A 类像素的影响来突出画面主要部分。

3) AC, A 类像素处理保持不变, 取  $W = W_A$ , 调整 C 类像素的色域映射算法, 增大  $\alpha$  使算法中间值  $W_C = W_A$ , 以得到新的 C 类像素色域映射算法的转换结果, 从而减少白色子像素对于 A 类像素的影响来突出画面主要部分。

4) BB, 即连续的低饱和度色彩, 取  $W = \max(W_{B1}, W_{B2})$ , 若  $|W_{B1} - W_{B2}| < 10$ , 则不再调整, 否则重新调整  $W_{B1}$  和  $W_{B2}$  中较小值对应的  $R_w, G_w, B_w$  值, 以适应白色子像素值的增大。

5) BC, 即低饱和度色彩和其他色彩的交界处, 由于 B 类色彩是消色主导的色彩, 因此在进行色域转换时可调整性强, 使  $W_B = W_C$ , 之后对 B 类像素对应的  $R_w, G_w, B_w$  进行调整, 以适应白色子像素值的改变。

6) CC, 即连续的其他色彩, 取  $W = \max(W_{C1}, W_{C2})$ , 若  $|W_{C1} - W_{C2}| < 10$ , 则不再调整, 否则重新调整  $W_{C1}$  和  $W_{C2}$  中较小值对应的  $R_w, G_w, B_w$  值, 以适应白色子像素值的增大。

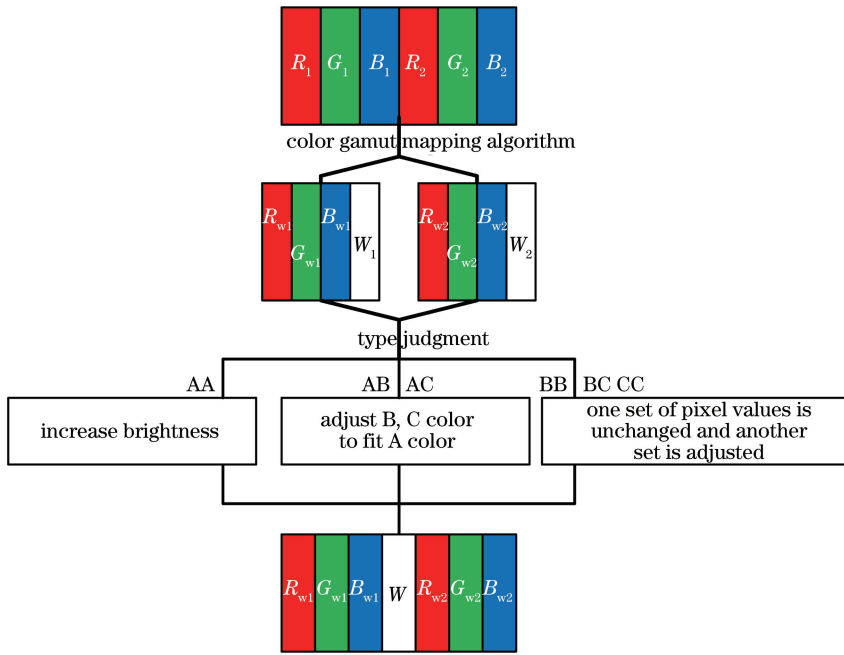


图 5 着色算法流程

Fig. 5 Processing of rendering algorithm

#### 4 子像素转换及着色算法的仿真实验

图 6 所示为实验得到的文字图像测试结果,其中,图 6 (a)为 RGB 模拟效果图,图 6(b)为常规算法  $\alpha = 1.5$  时传统条纹式 RGBW 的模拟效果图,图 6(c)为本文算法模拟的 RGBWRGB 效果图,  $\alpha =$

$1.5, \alpha_1 = 1.5, \alpha_2 = 1.2$ 。

图 7 所示为实验得到的 Lena 图像测试结果,其中,图 7 (a)为原始图片,图 7(b)为 RGB 模拟效果图,图 7(c)为常规算法  $\alpha = 1.5$  时的传统条纹式 RGBW 模拟效果图,图 7(d)为本文算法模拟的 RGBWRGB 效果图,  $\alpha = 1.5, \alpha_1 = 1.5, \alpha_2 = 1.2$ 。



图 6 文字图像的测试效果。(a) RGB;(b)常规算法 RGBW;(c)本文算法 RGBWRGB

Fig. 6 Test results of words image. (a) RGB; (b) conventional algorithm RGBW; (c) proposed algorithm RGBWRGB



图 7 Lena 图像的测试效果。(a)原始图片;(b) RGB;(c)常规算法 RGBW;(d)本文算法 RGBWRGB

Fig. 7 Test results of Lena image. (a) Original image; (b) RGB; (c) conventional algorithm RGBW;

(d) proposed algorithm RGBWRGB

根据图 7 测试结果可以看出,本文算法同常规算法都可以很好地适用于色彩简单的图片。图 8 为

实验得到的复杂色彩图像的测试结果,其中,图 8 (a)为原始图像,图 8(b)为原始图像的 RGB 模拟效

果图,图 8(c)为常规算法  $\alpha = 1.5$  时的传统条纹式 RGBW 模拟效果图,图 8(d)为本文算法的

RGBWRGB 模拟效果图,  $\alpha = 1.5, \alpha_1 = 1.5, \alpha_2 = 1.2$ 。



图 8 复杂图像的测试效果。(a)原始图片;(b)RGB;(c)常规算法 RGBW;(d)本文算法 RGBWRGB

Fig. 8 Test results of complex image. (a) Original image; (b) RGB; (c) conventional algorithm RGBW; (d) proposed algorithm RGBWRGB

根据亮度模型及 Matlab 软件中 RGB 到亮度的函数实现<sup>[15]</sup>, 图片像素的亮度灰度值可通过  $Y = 0.3 \times R + 0.6 \times G + 0.1 \times B$  计算, 测试图片平均亮度的灰度值如表 1 所示, 测试图像与原图像的峰值信噪比如表 2 所示。

表 1 测试图片的平均亮度灰度值

Table 1 Average brightness gray value of test images

Image	RGB	RGBW	RGBWRGB
Fig. 7	31.9958	35.8838	35.0378
Fig. 8	27.5801	28.8334	28.9112

表 2 与原图像的峰值信噪比对比结果

Table 2 Peak signal to noise ratio

compared to original image dB

Image	Conventional algorithm	Proposed algorithm
Fig. 7	36.9453	38.5230
Fig. 8	37.5391	39.4173

观察和比较图 8(c)和(d)可以发现, 本文算法对多处细节处理优于常规算法。对于高纯度的色彩, 本文算法能很好地进行亮度补偿, 如图中黄色、红色和绿色身体部分; 对于低纯度的色彩, 采用本文算法和特殊着色处理后, 转换过后的色彩没有产生过曝效果, 而图 8(c)中的常规算法使得鹦鹉脸部白色部分的亮度提升过大显得不自然, 而且在左数第三只鹦鹉身体部分蓝色与黄色交界处出现了明显的白色线条。采用本文算法着色处理后, 图片不同色彩交界处的细节得到了更好的还原, 如图中鹦鹉面部纹理部分。由于原图像经过子像素着色后的图像分辨率相同, 但子像素排列不相同, 因此峰值信噪比不能很好地反映原图像与经过着色算法后图像的差异, 仅作参考, 但从数值上可以看出, 本文算法对于图像的还原能力略高于传统算法。

## 5 结 论

多基色显示系统解决了三基色系统所遇到的技

术瓶颈, 而如何将三基色信号转化为多基色信号是实现多基色显示系统的基础。分析了常见的 RGBW 排列结构的不足, 提出了一种 RGBWRGB 的排列结构, 考虑到色域映射算法的复杂性与适应性等因素后, 对现有的常规算法进行改进, 将色彩分为三类进行处理, 通过实验验证可知, 在简单图片上, 本文算法和排列结构与传统 RGBW 排列和算法均能很好地呈现图片, 但在复杂图片上, 本文提出的排列结构和算法明显优于常规的排列和算法。

## 参 考 文 献

- [1] Pan D P. A study on characteristics and assessment for mapping algorithms of RGBW display [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. 潘定平. RGBW 显示器的特性及映射算法评价方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [2] Mei J J, Liu L L. Research on white light color temperature deviation based on tricolor LEDs [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0833001. 梅健健, 刘丽兰. 基于三基色 LED 的白光色温偏差研究[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0833001.
- [3] Liu Z X. Study on characteristics of multi-color LED display [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011. 刘祖希. LED 多基色显示特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [4] Lee C, Monga V. Power-constrained RGB-to-RGBW conversion for emissive displays: optimization-based approaches [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2016, 26(10): 1821-1834.
- [5] 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.
- [6] Feng J, Yan L M, Chen J. A color gamut optimization algorithm for RGB to RGBW conversation[J]. Optoelectronic Technology, 2015, 35(2): 135-139, 143.  
冯俊, 严利民, 陈静. 一种 RGB 到 RGBW 的色域转换优化算法[J]. 光电子技术, 2015, 35(2): 135-139, 143.
- [7] Kim B, Choi K. Color contrast enhanced RGBW conversion[J]. 2015 IEEE 4th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), 2015: 181-182.
- [8] Rafinazari M, Dubois E. Demosaicking algorithm for the Kodak-RGBW color filter array [J]. Color Imaging XX: Displaying, Processing, Hardcopy, and Applications. International Society for Optics and Photonics, 2015, 9395: 939503.
- [9] Chi N, Lu X Y, Wang C, *et al.* High-speed visible light communication based on LED [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0300001.  
迟楠, 卢星宇, 王灿, 等. 基于 LED 的高速可见光通信[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0300001.
- [10] Pan D P, Jin W Q, Qiu S, *et al.* RGBW signal mapping algorithm assessment based on colorimetry [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(10): 3119-3126.  
潘定平, 金伟其, 裘溯, 等. 一种基于色度学的 RGBW 信号映射算法评价方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(10): 3119-3126.
- [11] Liu Z X, Ma G X. Design of multi-primary display system using linear programming [J]. Optical Technique, 2010, 36(6): 834-837.  
刘祖希, 马国欣. 一种基于线性规划的多基色显示系统设计[J]. 光学技术, 2010, 36(6): 834-837.
- [12] Lee B, Park C, Kim S, *et al.* TFT-LCD with RGBW Color System [C] // SID Symposium Digest of Technical Papers, 2003, 34(1): 1212-1215.
- [13] Kim S, Kim M, Kim J S, *et al.* Fixed-ratio compression of an RGBW image and its hardware implementation[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2016, 6(4): 484-496.
- [14] Yan L M, Xia M Z, Wang Z M. A three primary multi-subpixel rendering algorithm with improved pixel per inch[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(12): 121101.  
严利民, 夏明治, 王子铭. 提高每英寸像素数的三基色多子像素着色算法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(12): 121101.
- [15] Shi M, Shen L, Long S, *et al.* The revision of conversion formula from RGB color space to HSV color space [J]. Basic Sciences Journal of Textile Universities, 2008, 21(3): 351-356.  
石美红, 申亮, 龙世忠, 等. 从 RGB 到 HSV 色彩空间转换公式的修正[J]. 纺织高等基础科学学报, 2008, 21(3): 351-356.