

文章编号:1007-2780(2019)06-0556-08

虚拟像素显示均匀性及相关问题的分析和应对

皇甫鲁江*, 李真真, 谭文静, 黄 硕, 赵 辉, 史世明

(京东方科技集团股份有限公司 技术中心, 北京 100176)

摘要:针对虚拟像素显示均匀性表现的一些问题,本文通过分析典型虚拟像素和真红绿蓝像素亮度中心的形成,对比了虚拟像素显示器与真红绿蓝像素显示器像素亮度中心分布的特点。在典型虚拟像素显示器中,红、蓝子像素数量少于绿子像素。低空间频率分布的红、蓝子像素对均匀分布的绿子像素亮度分布的调制造成虚拟像素亮度中心分布均匀性下降,并影响显示均匀性表现效果。本文提出采用不均匀分布的绿子像素排布,通过红、蓝子像素的亮度调制实现虚拟像素亮度中心均匀分布。初步的傅里叶分析和视觉对比表明,新虚拟像素显示均匀性表现效果符合预期。

关 键 词:虚拟像素;亮度中心;分布均匀性

中图分类号:TN873 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20193406.0556

Analysis of luminance uniformity and relevant issues with virtual pixel display and countermeasures

HUANGFU Lu-jiang*, LI Zhen-zhen, TAN Wen-jing,

HUANG Shuo, ZHAO Hui, SHI Shi-ming

(Technology Center, BOE Technology Group Co., LTD., Beijing 100176, China)

Abstract: Aiming at some luminance uniformity issues with virtual pixel displays, the forming of luminance centroid of a typical virtual pixel and real red-green-blue pixel were analyzed. The distribution features of pixel luminance centroids between the virtual pixel display and common real red-green-blue pixel display were compared. In the virtual pixel display, red and blue sub-pixels were less than green sub-pixels. The uneven distribution of pixel luminance centroid in the virtual pixel display, which might cause some perception differences to common real red-green-blue pixel display, was attributed to the brightness modulation of the red and blue sub-pixels distributed at lower spatial frequency on the green sub-pixels of even distribution. In this paper, the countermeasure was proposed to improve pixel luminance centroids uniformity of virtual pixel display by applying uneven distribution of green sub-pixel arrangement along with brightness modulation of proper red and blue sub-pixel arrangement. The effectiveness was preliminarily verified by Fourier series analysis and visual comparison.

Key words: virtual pixel; luminance centroid; distribution uniformity

收稿日期:2019-01-02;修订日期:2019-03-26.

* 通信联系人, E-mail: lj.huangfu@boe.com.cn

1 引言

像素是数字画面显示最小独立表现单元。在红、绿、蓝三基色色彩空间中,彩色像素需要由亮度独立可控的红、绿、蓝三基色子像素构成,通过混色效应表现所需的色彩和亮度。这种像素通常也称为真红绿蓝像素,包括像素构成以及对应的子像素数字亮度灰阶信号(后文多简称为信号)。目前,主流彩色数字显示系统多数采用这种真红绿蓝像素。

市场对高品质显示的追求使彩色显示器的分辨率不断提高,在某些应用领域已经达到了人眼分辨能力相当的水平。例如苹果公司 iPhone 4 及之后产品采用的“视网膜屏(Retina screen)”,其 326 ppi(Pixels per inch,每英寸像素数)及以上分辨率就已经达到设定应用条件下人眼的分辨能力水平。高分辨率增大了显示器的制作难度,如目前应用于移动显示的有源矩阵有机电致发光二极管(Active Matrix Organic Electric Luminescence Diodes, AMOLED)显示器,其子像素图形化主流技术 FMM(Fine Metal Mask, 精细金属掩模版)的水平,很大程度上制约了真红绿蓝高 ppi AMOLED 显示器的制作。

对人类视觉特性的研究发现,人眼对亮度和不同颜色图形(边缘、形状)的分辨能力是有差异的^[1]。其中对亮度(明暗对比)图形的分辨能力最高,红色(红绿对比)图形次之,蓝色(蓝黄对比)图形最低。由于绿子像素的亮度效应高(占白平衡~65%),红、绿、蓝三基色彩色显示器中,绿子像素密度是像素亮度分辨率表现的基础。当真红绿蓝像素显示器分辨率表现能力达到人眼分辨能力水平时,真红绿蓝像素中红、蓝子像素密度及相应的基色分辨率表现能力就可能出现冗余。这意味着有可能通过优化像素构成及子像素相关信号的方法减少真红绿蓝像素显示系统中部分红、蓝子像素,在维持显示器亮度分辨率表现能力前提下,降低制作难度^[2]。

本文把基于真红绿蓝像素红、蓝分辨率表现能力冗余的消减,由不完备子像素集构成的与真红绿蓝像素对应的画面最小表现单元称为低冗余虚拟像素,简称虚拟像素。合理的虚拟像素方案可以实现真红绿蓝像素亮度分辨率表现能力和相

近显示效果。为便于叙述和区分,本文把真红绿蓝像素中的红、绿、蓝单基色子像素或信号用小写字母 r 、 g 、 b 表示,低冗余虚拟像素中的红、绿、蓝单基色子像素或信号用大写字母 R 、 G 、 B 表示。通常每个虚拟像素包含一个独立的 G 子像素,以确保虚拟像素(亮度)分辨率表现能力,但 R 、 B 子像素数减少,以此降低制作难度。同时,虚拟像素 R 、 B 子像素信号需要通过一定的算法与相关多个真红绿蓝像素的 r 、 b 信号对应,以一定程度弥补子像素数量减少造成的表现能力损失。

基于人眼亮度、色彩分辨能力的差异,合理的低冗余虚拟像素 $R:G:B$ 量比有 $2:2:1$ 构成 2 个虚拟像素方案,相当于 2 个真红绿蓝像素中的子像素中减少 1 个 b 子像素,如 PenTile 矩阵^[2];以及 $1:2:1$ 构成 2 个虚拟像素方案,如条状 RGBG 子像素行排布(stripe-RGBG)^[3],以及菱形 RGBG 子像素排布(Diamond-RGBG)^[4],相当于 2 个真红绿蓝像素中的子像素减少了 1 个 r 、1 个 b 子像素,等等。

菱形 RGBG 子像素排布,(寻址行内)左右相邻虚拟像素共享 R 、 B 子像素的虚拟像素技术在移动 AMOLED 中得到了广泛应用,降低了制约性关键技术 FMM 技术的工艺难度,使得 AMOLED 的分辨率表现水平也能达到人眼的分辨能力水平。本文对低冗余虚拟像素的分析均以此为例进行。

2 虚拟像素相关问题分析

图 1 是菱形 RGBG 虚拟像素构成示意图,显示暗(黑)背景下亮(白)图形“ $\neg$ ”。子像素排布最小重复单元由 1 个 R 、2 个 G 、1 个 B 子像素构成,可以认为包含 RG 、 BG 2 个(寻址)虚拟像素。需要着重说明的是,图中及本文其他部分亮度中心位置是按重心法得到的^[5],由于人眼分辨阈值和混色效应的影响,在不能分辨像素边界时,这一位置接近人眼感受的亮斑中心位置。也由于子像素形状对所讨论问题没有实质影响,所以本文示意图中子像素按简单、布图均衡原则采用了圆形等图形。每个虚拟像素中的 G 子像素一一对应表现真红绿蓝像素的 g 信号, R 、 B 子像素则需要采用子像素渲染(sub-pixel rendering, SPR)方法^[6],按同行左右相邻虚拟像素共享算法表现相

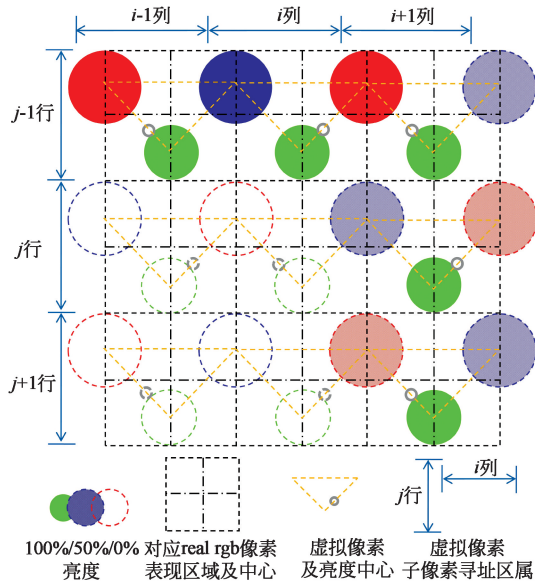


图 1 菱形 RGBG 虚拟像素构成示意图

Fig.1 Sub-pixel arrangement of diamond RGBG virtual pixel

邻 2 个真红绿蓝像素信号中 r、b 信号。典型的 SPR 驱动算法如下：

$$\begin{aligned}
 G_{i,j} &= g_{i,j} \\
 R_{i,j} &= \left(\frac{r_{i-1,j}^\gamma + r_{i,j}^\gamma}{2} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \\
 G_{i+1,j} &= g_{i+1,j} \\
 B_{i+1,j} &= \left(\frac{b_{i,j}^\gamma + b_{i+1,j}^\gamma}{2} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \\
 G_{i,j+1} &= g_{i,j+1} \\
 B_{i,j+1} &= \left(\frac{b_{i-1,j+1}^\gamma + b_{i,j+1}^\gamma}{2} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \\
 G_{i+1,j+1} &= g_{i+1,j+1} \\
 R_{i+1,j+1} &= \left(\frac{r_{i,j+1}^\gamma + r_{i+1,j+1}^\gamma}{2} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (1)
 \end{aligned}$$

SPR 算法表达式中 R、G、B 和 r、g、b 分别表示虚拟像素和真红绿蓝像素中子像素的灰阶信号，等号左侧下标表示 R、G、B 子像素所属虚拟像素寻址坐标，右侧下标表示输入真红绿蓝信号设定像素寻址坐标。参数 γ 涉及到 γ 函数，该函数表示显示亮度 (L) 与灰阶信号的关系 $L_x = C_x \cdot x^\gamma$ (字母 x 代表 r、g、b 或 R、G、B 信号，下标 x 代表对应的子像素， C_x 由子像素器件特性决定)，算法表达式中信号 R、B 与信号 r、b 的 γ 变换及逆变换复合关系，表示 R、B 信号分别由相邻像素 r、

b 信号对应的亮度整体效果决定^[7]。

上述子像素构成及 SPR 算法可以维持相应真红绿蓝像素(亮度)分辨率表现水平，大多数情况下也有可接受的画面表现效果。但 R、B 子像素的减少不可避免地会造成部分画面信息损失，在某些情况下，还是可能造成一些可察觉的显示缺陷。基于与相应真红绿蓝像素显示器表现效果对比，被提及较多的效果瑕疵是所谓“颗粒感”^[8]等均匀性表现问题。下面尝试分析其产生的原因。

包括真红绿蓝像素在内，同场并置基色(Field Apposition Color, FAC)子像素排布构成的像素，由于子像素可实现形状和位置的限制，很难完全再现系统信号采样所设定的情况，会存在空间失配(Spatial aliasing, 也有译作“走样”)^[9]问题。在此重点讨论与虚拟像素子像素构成相关的空间失配对显示效果的影响。在分辨率不充分等情况下，这些问题可能表现为可察觉的画面表现效果瑕疵。

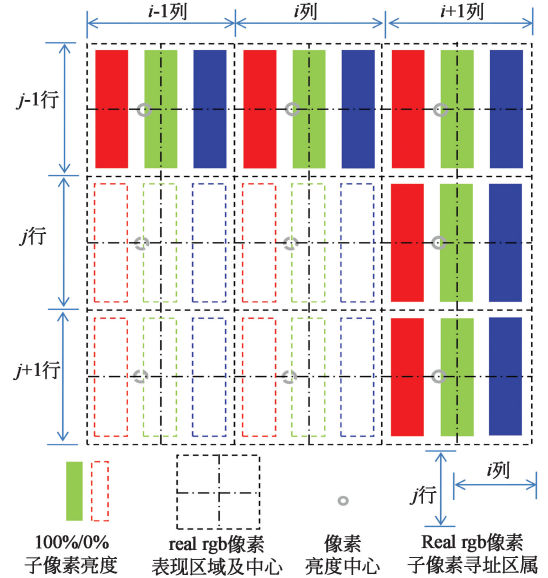


图 2 真条状红绿蓝像素构成示意图

Fig.2 Sub-pixel arrangement of real rgb pixel

图 2 是最常见的真条状红绿蓝像素构成示意图，也显示暗背景下亮图形“ $\neg$ ”。各基色子像素的混色效应在产生所需像素色彩和亮度的同时还形成像素的亮度中心。按系统设定，像素 r、g、b 信号再现的子像素亮度中心位置都应位于像素表现区域中心。实际上，由于工艺等限制，子像素通常为简单矩形(条状)。当并置排布 g 子像素居

时,则 r 、 b 子像素位置横向偏离了像素中心。像素表现白平衡时, g 贡献 $\sim 65\%$ 亮度、 r 贡献 $\sim 30\%$, b 仅贡献 $\sim 5\%$ (具体比例与目标白平衡和基色色坐标相关),混色后像素亮度中心大致落在 g 、 r 中心连线近 g 端 $1/3$ 处,参见图 2 中标注。像素表现白点亮度中心偏离了系统设定的像素中心位置,即亮度中心与设定的位置出现空间失配。对于真条状红绿蓝像素,所有像素表现的白点均会出现相同的亮度中心偏离,表现画面中的图形、图案通常没有畸变,也不易出现由此引起的可察觉缺陷。

像素单基色表现的位置相对于像素亮度中心的偏离称为色彩空间失配^[10],基色色彩空间失配对混色效果有不利影响。由于 g 子像素的亮度效应, g 子像素表现位置接近像素亮度中心, g 色彩的空间失配较小。但 r 、 b 子像素的表现位置距像素亮度中心距离相对较大, r 、 b 基色表现空间失配较大。真条状红绿蓝采用 g 子像素居中结构,就是为了尽量减小居于两侧的 r 、 b 基色子像素表现的空间失配,加上人眼对 r 、 b 基色的分辨能力相对较低,大多数情况下 r 、 b 基色的空间失配也不会对混色效果有明显的影响。

在菱形 RGBG 虚拟像素中,由于 R 或 B 子像素数量是 G 子像素的一半,混色效应作用下共享 R 、 B 子像素会对相邻虚拟像素由均匀排布 G 子像素主导的亮度中心位置分布产生调制,造成相邻虚拟像素亮度中心不同方向的空间失配,影响亮度中心分布均匀性,参见图 1 中亮度中心位置。视觉上,这种差异性空间失配相当于在像素表现均匀分布亮度信号时附加 R 、 B 分布周期的明暗涨落信号。虽然附加亮度分布强度较弱,不会影响虚拟像素的亮度分辨率表现能力,但可能产生亮度均匀性表现效果瑕疵。需要说明的是,所谓均匀是基于系统设定的像素空间周期性分布间距。因亮度中心空间失配产生的周期大于像素间距的周期性明暗信号,被认为可能和显示内容干涉影响虚拟像素均匀性表现效果。

这里对虚拟像素亮度中心空间失配比较容易察觉的影响进行说明。参照图 1 显示图形“ $\neg$ ”的横向单像素白线部分(第 $j-1$ 行),混色效应下相邻虚拟像素由 G 子像素主导的亮度中心会分别向不同方向的共享 R 子像素偏移,造成虚拟像素亮度中心两两远离的邻域($i-1, i$ 列之间)偏暗,

同时两两靠近的邻域($i, i+1$ 列之间)偏亮。在虚拟像素分辨率与人眼分辨能力水平接近条件下,横向 2 倍虚拟像素间距周期的附加明、暗分布就容易产生可察觉的不均匀感了。二维均匀亮度表现区域,这种 R 、 B 子像素对 G 子像素主导的亮度中心调制同样存在,也会形成大于像素分布周期的明暗分布。由于分布周期大于像素间距,容易产生视觉效果上的颗粒感。亮度中心空间失配更直接的影响是单线图形或图形边缘畸变,参见图 1 显示图形“ $\neg$ ”的竖线部分,出现了 S 型畸变,只是能察觉这种畸变的情况较少。

虚拟像素中,基色的空间失配也容易产生可察觉的影响。由于 R 、 B 子像素量比例小,使低冗余虚拟像素很难简单地确保 G 子像素居中的排布结构,造成 R 、 B 基色空间失配增大,影响 R 、 G 、 B 间的混色效果。在均匀白图形内部,除同一虚拟像素的 R 、 G 、 B 子像素基色间混色外,相邻不同虚拟像素子像素间也会产生混色效应,可以弥补子像素基色空间失配对混色效应的不利影响。但如果遇到了图 1 显示图形“ $\neg$ ”横线部分(第 $j-1$ 行) G 子像素集中在下缘的情况, R 、 B 子像素基色空间失配就会集中影响上下方向整体混色效果,产生易察觉的色彩分离,表现为横向白线或白色图形的下缘偏绿。

3 虚拟像素显示不均匀及相关问题的应对

因基色子像素表现空间失配造成的虚拟像素亮度中心分布不均匀,以及色彩分离等现象通常可以通过优化 SPR 算法,对称地共享更多的周边 R 、 B 子像素改善^[11]。但复杂算法容易使虚拟像素子像素涉及的范围尺度大于像素间距,更容易与特定显示内容干涉而影响显示效果,因此应用并不普遍。本文提出采用新的子像素排布结构构成虚拟像素,并配套相应简单 SPR 算法,可以较好地解决相关问题。

根据前文分析,低冗余虚拟像素显示器亮度均匀性表现缺陷的主要原因,是由于大空间周期分布的 R 、 B 子像素对以像素间距周期均匀分布 G 子像素主导的虚拟像素亮度中心的调制。在 G 子像素均匀分布的情况下, R 、 B 子像素大周期调制产生的非均匀性附加明暗分布很难避免。

考虑到视觉信息中,亮度分布信息占有绝大部分,以及人眼对亮度分布信息的敏感性,确保显示器亮度分布成分信息的表现效果最为重要。因此我们提出采用非均匀 G 子像素排布的虚拟像素构成方案,经 R、B 子像素亮度调制,实现虚拟像素亮度中心的均匀分布。这一方案虽然降低了 G 子像素亮度分布的均匀性,可能影响 G 单色或 G 成分为主画面均匀性表现效果,但白平衡像素亮度中心分布的均匀性提高,整体效能是合理的。

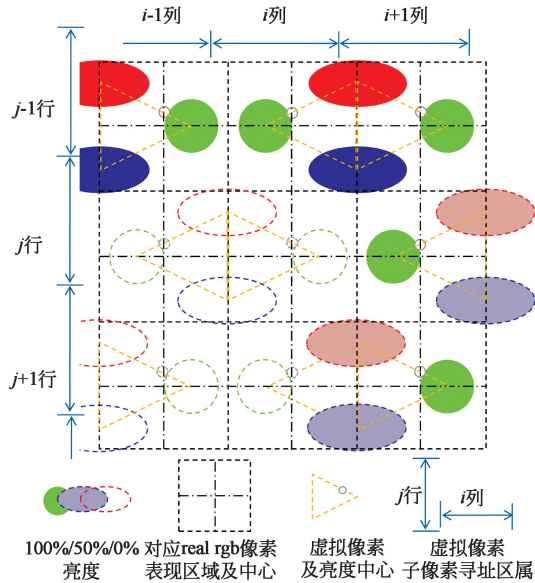


图 3 GGRB 虚拟像素构成示意图

Fig.3 Sub-pixel arrangement of GGRB virtual pixel

图 3 是这种低冗余虚拟像素(简称 GGRB 虚拟像素)构成方案的示意图,同样显示暗背景下亮图形“丿”。与菱形 RGBG 类似,子像素布图最小重复单元由 1 个 R、2 个 G、1 个 B 子像素构成,可以认为包含 RG、BG 2 个(寻址)虚拟像素。每个虚拟像素中的 G 子像素一一对应表现真红绿蓝像素的 g 信号,R、B 子像素按同行左右相邻虚拟像素共享算法表现相邻 2 个真红绿蓝像素信号中 r、b 信号。不同的是,由于上下重叠的 R、B 子像素集中排布在 G-G 子像素对的外侧,某个虚拟像素只能与外侧的同一相邻虚拟像素共享 R、B 子像素(传统算法分别与左、右两侧的 2 个虚拟像素共享 R、B 子像素)。为虚拟像素子像素寻址均衡,图 3 中上、下重叠排布的 R、B 子像素,居下的 B 子像素配属在下一寻址

行,SPR 驱动算法如下:

$$\begin{aligned} G_{i,j} &= g_{i,j} \\ R_{i,j} &= \left(\frac{r_{i-1,j}^{\gamma} + r_{i,j}^{\gamma}}{2} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \\ G_{i+1,j} &= g_{i+1,j} \\ B_{i+1,j} &= \left(\frac{b_{i,j-1}^{\gamma} + b_{i+1,j-1}^{\gamma}}{2} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \\ G_{i,j+1} &= g_{i,j+1} \\ B_{i,j+1} &= \left(\frac{b_{i-1,j}^{\gamma} + b_{i,j}^{\gamma}}{2} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \\ G_{i+1,j+1} &= g_{i+1,j+1} \\ R_{i+1,j+1} &= \left(\frac{r_{i,j+1}^{\gamma} + r_{i+1,j+1}^{\gamma}}{2} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \end{aligned} \quad (2)$$

在 GGRB 虚拟像素行内,G 子像素分布是间距不均匀的成对排布,G-G 子像素对内部 G 子像素横向间距小于系统设定的像素间距,中间没有共享 R、B 子像素;G-G 子像素对之间 G 子像素间距大于像素间距,共享的 R、B 子像素上、下重叠排布于 2 个 G-G 子像素对之间。通过混色效应,同行内横向不均匀排布 G 子像素主导的虚拟像素亮度中心,经 R、B 子像素调制可实现亮度中心分布均匀性改善,参见图 3 中标注的虚拟像素亮度中心位置。

对于边缘色分离,GGRB 虚拟像素构成中,R、B 子像素上、下排布确保了 G 子像素纵向自然居中,各基色纵向色彩空间失配都比较小,对混色影响也较小,参见图 3 显示符号“丿”的横线部分;同时,上、下相邻的虚拟像素行采用关于 G-G 子像素对中轴与间界交错排布,避免在表现纵向白图形边缘或单像素竖线时 G(或 R、B)子像素集中在白图形边缘或竖线一侧,各虚拟像素基色空间失配的影响集中显现。参见图 3 显示图形“丿”的竖线部分,由于竖线中上下虚拟像素的基色空间失配互补,也不易察觉色分离。

4 新虚拟像素方案效果验证

4.1 一种典型相关情况的傅里叶分析

空间频率用以描述变量(信号)在空间维度上分布的周期性,图像信号空间频率高于或分布周期小于某个阈值时,人眼不能分辨亮度的变化^[1],即看起来“均匀”。显示器相关设计时倾向于把像

素间距设定在人眼分辨阈值以下,使人眼只能感受到多像素表现的图像信号起伏而感受不到像素间亮度不连续的颗粒感。RGBG类虚拟像素因相邻虚拟像素的差异,表现均匀亮度时亮度分布中除人眼不易察觉的虚拟像素间距周期的成分,还会包含易察觉、与显示内容可能干涉的大于虚拟像素间距周期的成分即不均匀成分,两种成分分别对应高、低空间频率。傅里叶分析可以对比相关频率成分比例尤其是低频成分的比例,以此判断均匀性表现效果。

我们对单像素亮(白)横线在2种不同虚拟像素显示器中的效果进行傅里叶分析。为便于计算假设子像素发光区都是边长为 $1/3$ 像素间距 p 的正方形,R、G、B子像素发光面积比为 $1:2:1$ 。这一假设与图1、图3示意情况稍有差异,子像素形状不同,R、B发光面积略小,但对分析结果无根本影响。由于B子像素亮度很低,还忽略B子像素亮度的影响。白平衡下,R、G子像素发光区域亮度近似相等。在构成两个横向相邻虚拟像素的子像素横向排布最小重复单元内,显示单像素横向亮线时,单元内(一维)亮度分布如图4所示。

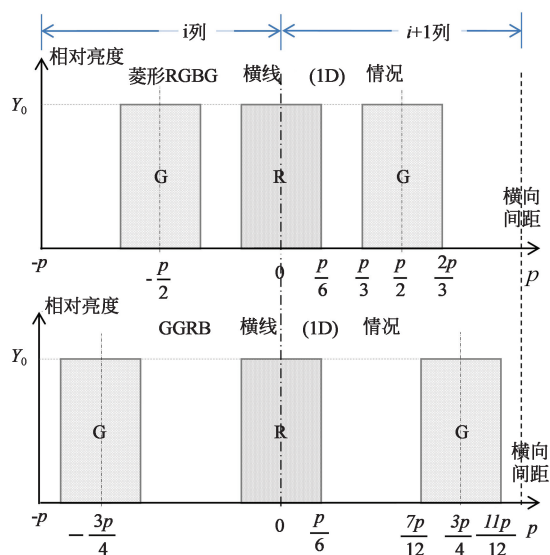


图4 最小重复单元内R、G亮度一维分布

Fig.4 1D luminance distribution of R&G within minimum replication of sub-pixel arrangement

其中 p 为(虚拟)像素间距,子像素横向分布最小重复周期为 $2p$ 。以 $2p$ 为基本分布周期,对

应空间分布频率基频 ω_0 ,把像素亮度分布在空间频率域展开成傅里叶级数,得到虚拟像素显示亮度分布对应的空间频率成分相对亮度分布如图5所示。

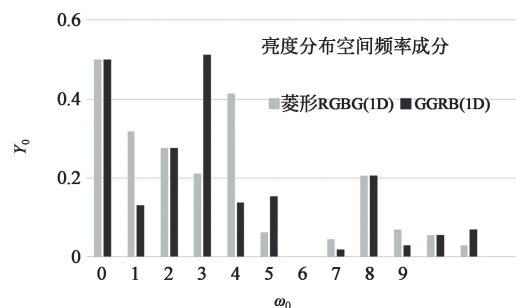


图5 亮度一维分布傅里叶空间频率成分

Fig.5 Fourier Spatial frequency component of 1D luminance distribution

其中, $0\omega_0$ 空间频率表示平均亮度, $2\omega_0$ 成分表示(虚拟)像素间距周期对应的亮度分布空间频率,分辨率充分时,这个频率及以上频率的亮度分布信号人眼不易识别,不会对显示内容造成影响。但当 $2\omega_0$ 对应像素间距与人眼分辨能力接近时, $1\omega_0$ 频率对应的横向最小重复单元为周期的亮度分布信号则可能被人眼识别而与显示内容干涉。例如,与显示内容无关的周期性亮度分布信号成分在均匀画面背景下容易产生颗粒感。如图5所示,GGRB 1D亮度分布中 $1\omega_0$ 成分远小于菱形RGBG 1D,理论上均匀性表现较好。

4.2 两种虚拟像素显示效果对比

在此仅对比新旧虚拟像素亮度均匀性及相关色偏表现。我们采用视觉效果差异比较容易显现的简单图形,包括横、竖单像素白色直线,以及白色矩形的下缘等。

图6是两种构成的虚拟像素表现横、竖单像素直线的实际效果放大照片。在观察距离渐远时,可以感到B子像素的位置感逐步减弱,肉眼感受到的B子像素信息逐步融入背景。进一步,混色效应使R子像素颜色区域边界逐步模糊,同时还能一定程度上感受到R、G子像素亮度分布。菱形RGBG表现的横线,G子像素横向均匀分布,但由于横向密度减半的R、B子像素的存在,尤其是R子像素亮度效应,容易感受到某一亮度背景上以R像素为(横向)中心G-R-G簇2倍像素间距的明暗分布;对于GGRB虚

拟像素,虽然两两一对的 G-G 子像素水平方向分布不均匀,但 R、B 子像素填补在 G-G 子像素对间,R 子像素的亮度填补了 G 子像素对间的低亮度空间,在水平方向上形成相对均匀的亮度分布。

两种虚拟像素表现单像素竖线时,菱形 RGBG 显示的竖线上下相邻虚拟像素中,G 子像素上下对齐,R 子像素分别在 G 子像素的左右两侧,造成亮度中心左右摆动,远观竖线有轻微扭曲感;相比之下,GGRB 显示的竖线中,虚拟像素 G、R 并不位于轴线上,而是分布在轴线左右两侧,使亮度中心尽量接近轴线,因此远观感受到的白竖线相对直而平滑。

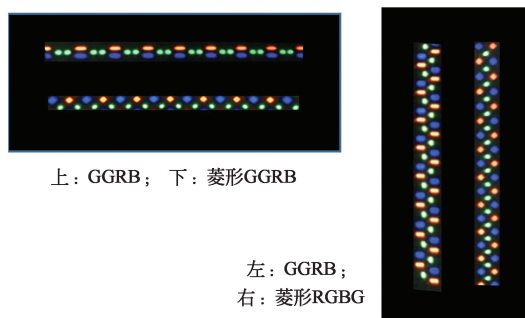


图 6 GGRB 和菱形 RGBG 虚拟像素表现横向和竖向直线效果对比

Fig.6 Comparison of horizontal and vertical lines displayed in GGRB and diamond RGBG virtual pixel display

图 7 是两种构成的虚拟像素表现的白色单像素水平和垂直平行线组小倍率的照片。相对于大倍率照片,小倍率照片中菱形 RGBG 表现的横向平行线组的颗粒感,以及竖向平行线组的扭曲感更容易被察觉。正如上述举例,可察觉的表现效果瑕疵主要出现在一定(分辨率)条件下的特定情况,对大多数显示情况,这类瑕疵对显示效果的影响并不明显。

图 8 是两种构成虚拟像素表现的白色矩形的下缘。可以看到,菱形 RGBG 虚拟像素表现的矩形下缘 G 子像素集中在下(外)侧。与内部 G 子像素被 R、B 子像素包围不同,下缘的 G 子像素仅在上方存在 R、B 子像素,同水平及下方无 R、B 子像素,因此混色效果与内部有所差异。由于下方 R、B 子像素的缺失,比较容易感受到下缘偏绿;与之相对,GGRB 虚拟像素下缘的 G 子像素

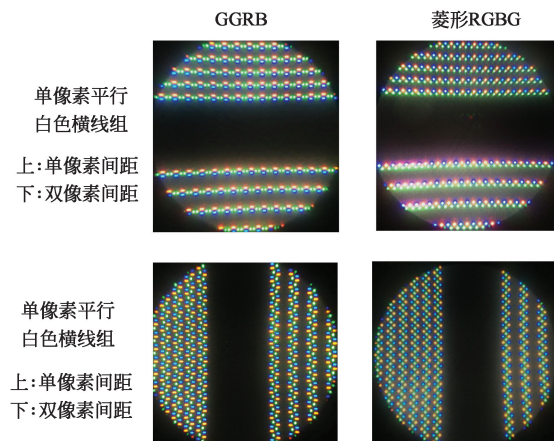


图 7 GGRB 和菱形 RGBG 虚拟像素表现横向和竖向平行线组效果对比

Fig.7 Comparison of horizontal & vertical parallel lines displayed in GGRB and diamond RGBG virtual pixel display

在垂直方向上居于 R、B 子像素之间,G 子像素相关混色条件与效果与内部相似,没有明显的下缘偏绿现象。

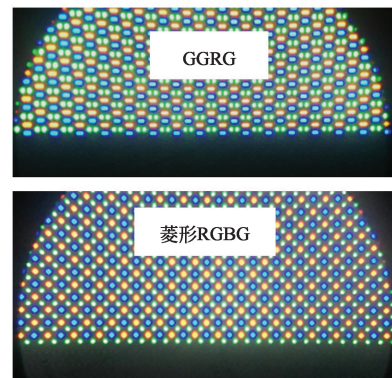


图 8 GGRB 和菱形 RGBG 虚拟像素表现白色矩形下缘效果对比

Fig.8 Comparison of white rectangle's bottom edge displayed in GGRB & diamond RGBG virtual pixel display

类似地,菱形 RGBG 虚拟像素表现的白色矩形上缘还可能被察觉微弱的偏紫,以及 GGRB 虚拟像素表现的白色矩形上缘更弱的偏红、下缘偏蓝。但由于红、蓝基色视觉敏感性的差异,这类色偏的影响远弱于边缘偏绿。另外,两种虚拟像素表现的白色矩形的左、右两侧边缘没有明显缺陷。

5 结 论

低冗余虚拟像素显示器中,G子像素分布密度同像素密度,R、B子像素数量少、分布密度低。由于像素的亮度中心主要由G子像素位置主导确定,虚拟像素构成中也通常倾向于采用均匀分布的G子像素排布方案。在R、B子像素混色效应的亮度调制下,G子像素均匀分布的虚拟像素显示器像素亮度中心分布会附加大周期的明暗分

布信号。这种不均匀的明暗分布可能造成画面均匀性表现效果与真红绿蓝像素表现效果出现差异。

基于降低G单基色均匀性表现效果,确保亮度信号均匀性表现效果的思想,本文提出了采用不均匀的G子像素排布,通过R、B混色效应的亮度调制,实现虚拟像素亮度中心的均匀分布的方案。经初步傅里叶级数分析和视觉对比评估,这种虚拟像素显示器在亮度信号均匀性表现效果等方面的改善符合预期。

参 考 文 献:

- [1] MULLEN K T. The contrast sensitivity of human colour vision to red-green and blue-yellow chromatic gratings [J]. *J. Physiol.*, 1985, 359: 381-400.
- [2] ELLIOTT B C H. Reducing pixel count without reducing image quality [J]. *Inf. Display*, 1999, 15: 22-25.
- [3] TAKAHASHI S, TAKASAGO H. Matrix-type color liquid crystal display device: US, US5113274 [P]. 1989-06-08.
- [4] KURAHASHI K. Color display apparatus: US, 4491863 [P]. 1985-01-01.
- [5] 李静,李为民,陈晓东,等.重心法在光电信号处理中的应用[J]. *光学技术*, 1999(2): 57-59.
LI J, LI W M, CHEN X D, *et al.* Application of center of gravity method in photoelectric signal processing [J]. *Opt. Technol.*, 1999(2): 57-59. (in Chinese)
- [6] ELLIOTT B C H, HAN S, IM M H, *et al.* Co-optimization of color AMLCD subpixel architecture and rendering algorithms [J]. *SID Symp. Dig. Tech. Pap.*, 2002, 33(1): 172-175.
- [7] TOMIZAWA K, NAKAMURA K. Display device: US, 8446435 [P]. 2013-05-21.
- [8] PenTile matrix family [EB/OL]. https://en.wikipedia.org/wiki/PenTile_matrix_family. (2018-10-16).
- [9] KLOMPENHOUWER M A, DE HAAN G. Subpixel image scaling for color matrix displays [J]. *J. Soc. Inf. Display*, 2003, 11(1): 99-108.
- [10] 杜慧敏,杜琴琴,季凯柏,等.后处理反走样技术综述[J]. *西安邮电大学学报*, 2016, 21(1): 7-15.
DU H M, DU Q Q, JI K B, *et al.* Survey on the post-processing anti-aliasing techniques [J]. *J. Xi'an Univ. Posts Telecomm.*, 2016, 21(1): 7-15. (in Chinese)
- [11] 黄成强,杨友昌,贺娟,等.基于权重因子的RGB-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.
HUANG C Q, YANG Y C, HE J, *et al.* RGB to RGBG conversion algorithm based on weighting factors and related FPGA realization [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2017, 32(7): 572-579. (in Chinese)

作者简介:



皇甫鲁江(1964—),男,山东菏泽人,博士,教授级高级工程师,2000年于西安交通大学获得工学博士学位,长期从事平板显示器产品和技术开发,现工作重点为AMOLED技术量产化和技术竞争力提升相关技术研发。E-mail:lj.huangfu@boe.com.cn