

doi:10.3788/gzxb20154402.0223002

# 一种消除LED显示屏动态假轮廓的脉宽调制法

周筱媛<sup>1,2</sup>, 袁胜春<sup>1</sup>, 李慧<sup>3</sup>, 张建奇<sup>1</sup>, 赵小明<sup>1</sup>

(1 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 西安 710071)

(2 西安科技大学 计算机科学与技术学院, 西安 710054)

(3 国网冀北电力有限公司技能培训中心, 河北 保定 071051)

**摘要:**针对LED显示屏播放运动画面时的动态假轮廓问题,提出了集中式门控脉宽调制法.该方法在原有门控脉宽调制技术的基础上,将PWM周期中的小数场固定于周期的中间,然后计算整数权重位对应的子场数并将其紧邻小数场实现.分析和实验表明,集中式脉宽调制法具有与线性PWM相似的点亮时间函数,能够将任意两灰度级间DFC指标的均值从GPWM方式下的0.6降到0.2以下.在有效消除DFC的同时又保持了GPWM的高刷新频率与高灰度级,从而明显改善图像的显示质量.同时算法实现简单,不需要额外的硬件支持.

**关键词:**发光二极管;显示屏;脉宽调制;占空比;图像显示;运动伪像;动态假轮廓;

中图分类号:TH873

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)02-0223002-6

## A Novel of Pulse Width Modulation for Eliminating the Dynamic False Contours in LED Display

ZHOU Xiao-yuan<sup>1,2</sup>, YUAN Sheng-chun<sup>1</sup>, LI Hui<sup>3</sup>, ZHANG Jian-qi<sup>1</sup>, ZHAO Xiao-ming<sup>1</sup>

(1 School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(2 School of Information and Computing, Institute of Computer Science and Technology, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

(3 Skills Training Center of State Grid Jibei Electric Power Company Limited, Baoding, Hebei 071051, China)

**Abstract:** Aimed at the problem of dynamic false contour in LED display when playing the motion images, a novel of PWM method named concentrated gated pulse width modulation was proposed. Based on the GPWM, the approach fixes the decimal subfields on the center of one PWM period, and then figures out the number of subfields corresponding to the integer weight bits, and locate them near the decimal subfields. Theoretical analysis and experiments show that CGPWM has the similar lighting function with linear PWM, and consequently reduces the average DFC values between any two gray levels from 0.6 under the control of GPWM to 0.2. CGPWM can eliminate DFC effectively while maintaining high refresh frequency and rich gray levels, and thus improve the image quality greatly. Furthermore, the processing to implement CGPWM is simple without extra hardware.

**Key words:** Light Emitting Diodes(LED); Display device; Pulse width modulation; Duty cycle; Image display; Motion artifact; Dynamic false contour

**OCIS Codes:** 230.3670;100.4145;1104280

## 0 引言

LED显示屏是户内外大型信息显示行业中的主

导产品,它具有发光体亮度高、面积大、视角宽等优点.其显示面板的物理像素由空间上分离的三基色(红、绿、蓝)LED灯按某种组合方式聚集而成<sup>[1-2]</sup>.由于人眼

**基金项目:**中央高校基本科研业务费专项资金(No. k5051305011)和陕西省教育厅科研计划项目(No. 2013JK140)资助

**第一作者:**周筱媛(1974-),女,讲师,博士研究生,主要研究方向为光电信号处理,平板显示信号处理. Email:1198641836@qq.com

**导师:**张建奇(1960-),男,教授,博导,主要研究方向为光电虚拟现实及红外与光电系统设计. Email:jqzhang@mail.xidian.edu.cn

**收稿日期:**2014-07-11; **录用日期:**2014-09-12

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

的空间混色效应以及视觉暂留特性,分别控制灯的亮度就可以实现图像/视频信号的真彩色显示.

在注入电流不变的前提下,LED亮度是通过周期性改变PWM占空比实现的.这种基于子场方式改变PWM占空比实现像素点亮度调制的做法,在显示静态画面时可以取得很好的显示效果.然而在播放运动图像时由于人眼对光强的瞬时积分效应使得在亮度变化缓慢的区域会出现与显示内容相关的线状噪音,这种运动图像干扰被称为动态假轮廓(Dynamic False Contours, DFC).它出现在几乎所有的时分分子场显示器(PDP显示器、LED显示屏等)中.较多的理论研究使得DFC更多的被关注于PDP显示器.然而作为累积发光技术的LED显示屏同样不可避免地存在该问题,只是一直以来复杂的户外显示环境使得人们忽视了该问题.因此,如何有效减弱或消除DFC应是LED显示屏运动图像质量提升领域研究的内容之一.

为了减弱甚至消除DFC对画面显示质量的影响,文献[3-6]提出子场重新分割法.该类方法针对易发生DFC的亮度级,通过增加子场数目、调整子场顺序来达到减轻DFC的目的.其具有计算简单、对驱动设计影响小、不会带来任何负面问题的优点;文献[7-8]使用非二进制编码方法,改变每个子场与亮度数据位的对应关系,使得各亮度级的显示时间相互重叠.这类方法虽能有效消除DFC,但也带来了图像模糊、灰度级范围下降的负面效应,同时增加了驱动设计的复杂性及信号处理的运算量;文献[9-10]提出运动补偿法,通过运动估计得出每帧图像各个像素的运动矢量,并在运动轨迹上对每帧图像进行插值,产生每个子场当前时间所对应的帧图像.于是,当人眼跟着运动轨迹进行光强积累时,将没有DFC产生.显然该方法的效果有赖于运动预估算法的准确性,否则易引入运动估计误差,且运算量极大,因而在实际中较少应用.子场重新分割法在理论上虽无法彻底消除DFC,但由于人眼有限的分辨率及易于实现的优点被显示行业广泛使用[5].

目前DFC问题的研究多集中于PDP显示器,而作为时分分子场实现亮度的显示设备——LED显示屏,与PDP显示器既有共性又有不同,因此上述提到的众多DFC消除法不能直接应用于LED显示屏上.为此本文从LED显示屏的亮度调制方式出发,提出了一种新颖的子场重新分割法——集中式门控脉宽调制法.该方法在门控脉宽调制技术(Gated PWM, GPWM)的基础上,取消整数位的权重,在一个调制周期内将点亮子场集中实现,使得各级亮度尽可能实现在相同的时间段,从而减少DFC发生的可能.实验与理论分析表明,该方法在保持LED显示屏高刷新频率和丰富灰度级的前提下,能够有效减弱DFC.同时,对其它时分分子场实现亮度的显示设备也有一定的借鉴作用.

## 1 脉宽调制技术与动态假轮廓问题

### 1.1 带门控的脉宽调制技术

图1(a)显示了描述像素点亮度的二进制数据(以 $n=4$ 位为例)如何按位将一个周期划分为不同宽度分立脉冲的过程.这样的调制过程被称为二进制脉宽调制(Binary PWM, BPWM).其中 $t_s$ 为最短脉宽,于是脉宽调制的周期 $T_B = \sum_{i=0}^{n-1} 2^i \cdot t_s$ .

比BPWM出现更早的PWM调制方式——线性PWM,如图1(b)所示,因为线性而连续的点亮时间,在显示运动图像时反而没有DFC发生.但是较大的电磁干扰等问题使得它被BPWM及其改进技术所取代.

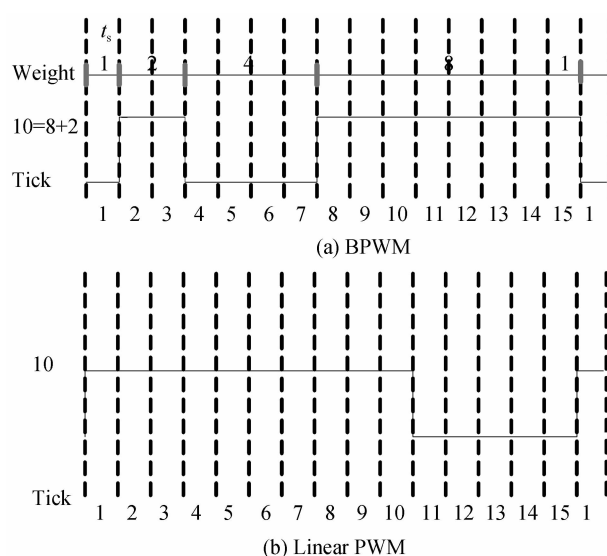


图1  $2^4$ 级亮度下BPWM与线性PWM的对比

Fig. 1 The comparison of linear PWM and BPWM at  $2^4$  gray levels

通常,显示设备能够呈现的亮度级数越多,显示图像就越真实.对于BPWM,每增加一位灰度,其调制周期就会增长一倍,相应的刷新频率就会降低.然而,追求稳定的画面效果又要求刷新频率越高越好.可见,刷新频率的提升与亮度的精细控制是一对矛盾.在有限脉宽条件下,为了尽可能地缩短 $t_s$ ,文献[9]提出了带门控的BPWM,简称GPWM.

GPWM在BPWM的基础上,增加门控开关OE,实现用比最短脉宽 $t_s$ 更窄的脉冲 $t_{min}$ 来表示一个二进制位,因此缩短了整个周期的长度.用 $t_{min}$ 实现的位称为小数权重位,对应的子场称为小数场.仍用整数个子场实现的位称为整数权重位.图2以 $2^6$ 级亮度为例,显示了将低三位设置为小数权重位时的脉宽分布示意图.对于 $n$ 位二进制编码的亮度数据,若设置低 $d$ 位为小数权重位,则对应的子场向量 $S = [1/2^d, 1/2^{d-1}, \dots, 1/2^2, 1/2^1, 2^0, 2^1, 2^2, \dots, 2^{n-d-1}]$ ,则GPWM的实现周期 $T_G$ 为

$$T_G = \sum_{i=0}^{n-d-1} 2^i \cdot t_s + d \cdot t_s \quad (1)$$

式中  $d$  代表小数权重位的位数,显然  $T_G < T_B$ . 因此 GPWM 缩短了调制周期,能够在实现更高亮度级数的同时提高刷新频率.

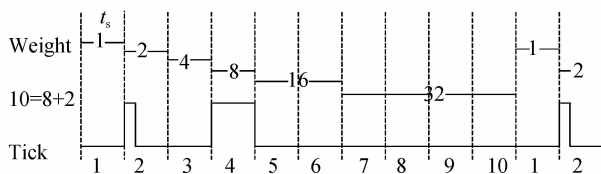


图 2  $2^6$  级亮度下将低三位设置为小数权重位时 GPWM 对调制周期的分割

Fig. 2 The segmentation of modulation period in the case of setting the lowest 3 bits decimal weight bits at  $2^6$  gray

通常,将 PWM 调制周期内子场全部点亮的时间与整个周期时间的比值描述为 LED 灯的发光利用率. 由于门控 OE 的作用,GPWM 下的发光利用率必然小于 1,且小数场越多,发光效率越低. 可见,GPWM 是以光的利用率为代价换取显示系统的高亮度级数和高刷新频率的. 然而,文献[10]经计算指出在满足显示效果的前提下,GPWM 的亮度损失不足 5%,故 GPWM 成为了目前 LED 显示屏行业应用最新的调制技术.

本质上 GPWM 与 BPWM 没有区别,它们都是通过二进制子场实现像素亮度控制的. 因此在后续有关 DFC 的讨论中如无特别说明均指 GPWM.

### 1.2 运动图像动态假轮廓问题

以  $n=8$  时为例,bit0~bit7 位在一个调制周期内分别对应不同的子场,点亮时间每高一位,相应的子场数增加一倍,如 bit0 对应 1 个子场,bit1 对应接下来的 2 个子场.....,bit7 对应最后的 128 个子场,共可实现 256 级灰度. 对于运动图像,假设某点的亮度由 127 变为 128,则显示亮度 127 的周期后半段(有 128 个子场)为“灭”状态,紧接着下一个周期显示亮度 128 时,前半段(有 127 个子场)也是“灭”状态. 于是,在人眼积分效应的作用下,视觉上就会产生一个黑色条纹. 类似地,当某点的亮度由 128 变为 127 时,就会出现白色条

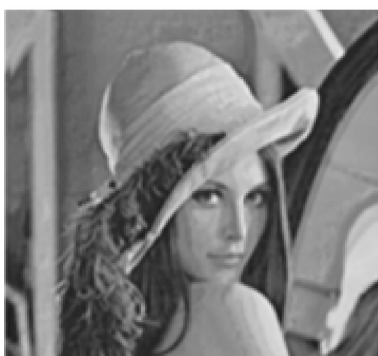


图 3 出现 DFC 的显示图像  
Fig. 3 A displaying image with DFC

纹. 这些在人眼视觉中出现,但原图像中没有的,类似于等高线状的噪音就是动态假轮廓. 图 3 给出了一幅出现 DFC 的仿真图片,其上的线状噪音在亮度变换缓慢的区域,如人的皮肤处显得尤其明显.

分析表明,DFC 就是运动图像反映到人眼中的一种虚假亮度级. 它之所以出现是由于在 GPWM 亮度控制方式下,亮度级上的微小变化却是在调制周期内完全不同的时间段上进行,使得相邻两个 PWM 周期上“灭”或“亮”的子场持续出现. 这种实现时间上的延迟导致了视觉空间上亮度的不连续,最终在显示图像上附加了额外的干扰信息. 因此在调制周期内若能将各亮度级尽可能实现在相同的时间段,将能达到减弱或消除 DFC 的目的. 于是,本文提出了集中式门控脉宽调制法(Centralized GPWM, CGPWM).

## 2 集中式门控脉宽调制法及理论分析

集中式门控脉宽调制法的基本思想是:在 PWM 调制周期中将小数场固定于中间位置,然后计算整数权重位对应的子场数并将其紧邻小数场实现.

设任意  $n$  位亮度的显示系统,CGPWM 方式下包含  $d$  个小数权重位,则相应的调制周期宽度为

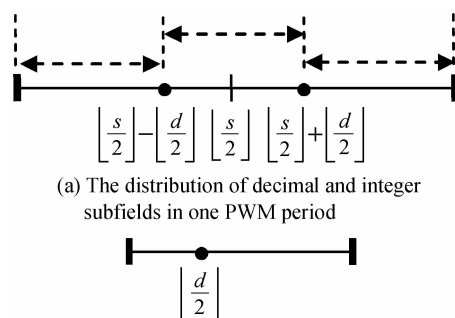
$$T_c = s \cdot t_s, \quad s = d + \sum_{i=0}^{n-d-1} 2^i \quad (2)$$

其中  $s$  为整个周期的子场总数,即小数场个数与整数场个数之和. 根据 CGPWM 的思想, $T_c$  由小数场宽度  $T'$  和整数场宽度  $T''$  组成,即

$$T_c = T' + T'' \quad (3)$$

$$\text{式中 } T' = \left[ \left\lfloor \frac{s}{2} - \frac{d}{2} \right\rfloor \cdot t_s, \left\lfloor \frac{s}{2} + \frac{d}{2} \right\rfloor \cdot t_s \right], \quad T'' = \left[ 0, \left\lfloor \frac{s}{2} - \frac{d}{2} \right\rfloor \cdot t_s \right] \cup \left[ \left\lfloor \frac{s}{2} + \frac{d}{2} \right\rfloor \cdot t_s, T_c \right].$$

图 4(a) 显示了  $T_c$  中的子场分布. 由于点亮子场从



(a) The distribution of decimal and integer subfields in one PWM period

(b) The half PWM period after moving the origin of coordinates to the right  $T_c/2$

图 4 CGPWM 下的子场分布

Fig. 4 The subfield distribution under the control of CGPWM

周期中点开始向左右伸展并对称分布,因此将坐标原点右移  $T_c/2$  后(如图 4(b)所示)不会影响分析结果. 于是忽略亮度损失,CGPWM 方式下点亮时间可近似为

式(4)的连续函数,即

$$f(t) = t \cdot t_s, t \in \left[0, \frac{T_c}{2}\right] \quad (4)$$

显然,这与线性 PWM 的点亮时间函数相似,因此 CGPWM 有类似于线性 PWM 的显示效果(即无 DFC 效应),同时又保持了 GPWM 的高刷新频率与高灰度级.

以 8 位亮度数据为例,若存在 3 个小数场,则每一

位亮度分别对应的脉宽依次为:  $1/8t_s, 1/4t_s, 1/2t_s, t_s, 2t_s, 4t_s, 8t_s, 16t_s$ . 根据式(2),将小数场位置固定于调制周期的中间,如图 5(b)所示,便可将 31 个整数场中的前 15 个分布于小数场之前,后 16 个分布于小数场之后.图 5 以 127 级亮度为例对 CGPWM 和 GPWM 的子场分布进行了对比.可见,CGPWM 达到了将各亮度级实现在相同时间段的目的.

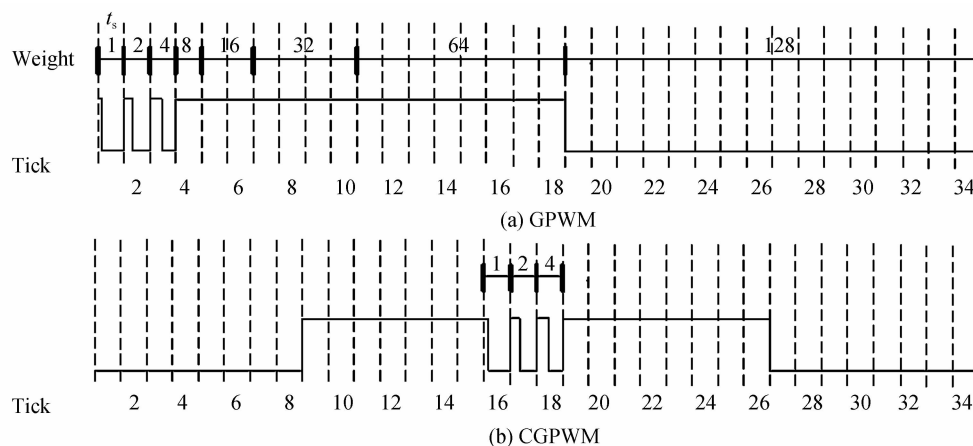


图 5 CGPWM 与 GPWM 的子场分布对比  
Fig. 5 The wave form comparison of GPWM and CGPWM operation

### 3 实验与结果分析

#### 3.1 DFC 的定量评测

在彩色 PDP 显示领域对 DFC 进行客观评价的方法中,动态积分法<sup>[10]</sup>和相对比值法<sup>[11-12]</sup>是两种应用较多的方法.它们分别从人眼的不同视觉特性出发定量评测 DFC 的严重程度.动态积分法基于人眼对光强的瞬时间积分效应,对图像子场进行积分,计算出反应到人眼中的灰度;相对比值法考虑了人眼视觉感受主要是亮度的相对变化,定义了一种量化方法.本文将上述两种思想结合,在动态积分法的基础上计算任意两灰度级之间的 DFC,并将其与所要实现的灰度级间的比值(即归一化的值)作为人眼对 DFC 感受程度的一种度量.

图 6(a)、(b)分别给出了 CGPWM 和 GPWM 方式下任意两灰度级之间 DFC 度量的三维图示.图中 X

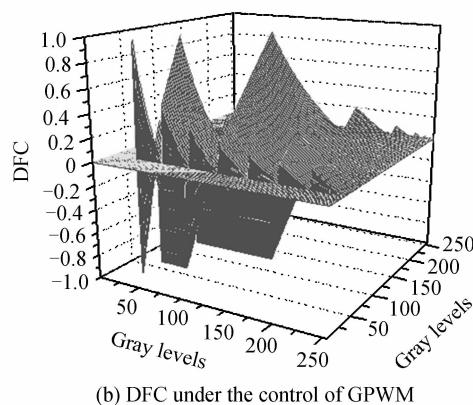
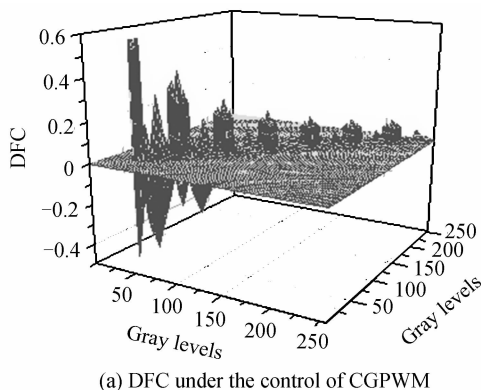


图 6 CGPWM 和 GPWM 方式下任意两灰度级之间 DFC 大小的三维图示  
Fig. 6 Under the control of CGPWM and GPWM, the 3D presents comparison of DFC degrees Between any two gray levels



轴、Y 轴分别表示相继实现的两个灰度级,Z 轴表示 DFC 的大小.对比看到,两图中规范化后的 DFC 最大值都达到了 1,但 CGPWM 的 DFC 明显弱于 GPWM 的 DFC.经计算 CGPWM 下任意两灰度级间 DFC 的均值为 0.2,而 GPWM 方式下 DFC 的均值为 0.6.文献[14-15]均指出与原始灰度差异低于 0.2 的灰度人眼是感知不到.可见,CGPWM 法有效减弱了人眼对 DFC 的感知.

另外 DFC 沿  $X=Y$  呈中心对称,且在  $X=Y$  附近出现极大值.这是因为改变两个灰度级的实现顺序,

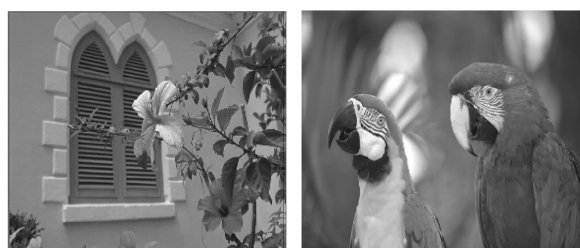
DFC 会呈现完全相反的两个状态(亮线或者暗线),但数值不变.

### 3.2 实验结果对比

图 7(a)为 lena 图像及从柯达标准图像库



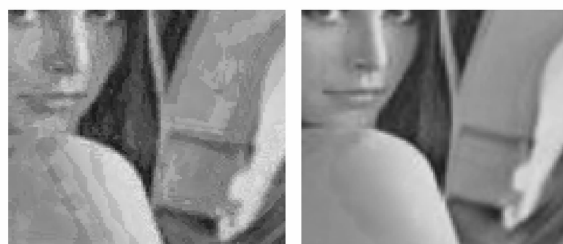
(a) The original images selected from Kodak Lossless True Color Image Suite



(b) The displaying images under the control GPWM



(c) The displaying images under the control CGPWM



(d) The comparison between the same part of the amplifying effect of lena image under the control GPWM and CGPWM respectively

图 7 GPWM、CGPWM 方式下图像的显示效果对比  
Fig. 7 The displaying comparison of different images under the control of GPWM and CGPWM

ISO12640-2<sup>[15]</sup>中选取的 3 幅包含不同特征信息的原始图像.图 7(b)、(c)分别为 GPWM、CGPWM 调制方式下的仿真图像.(d)为 GPWM 与 CGPWM 方式下部分放大后的显示效果.对比看到,CGPWM 调制方式下人眼已基本感觉不到 DFC.

### 3.3 显示质量分析

分析知道,DFC 是出现在显示图像中亮度变化缓慢区域中的一种线状噪音,因此选用峰值信噪比(式 5)和均方误差(式 6)对 GPWM、CGPWM 调制方式下的图像显示质量进行对比、分析.

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} \left( \frac{\text{MAX}_i^2}{\text{MSE}} \right) \quad (5)$$

$$\text{MSE} = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \| I(i, j) - K(i, j) \|^2 \quad (6)$$

式中  $\text{MAX}_i$  为显示图像中像素点亮度最大值.如每个采样点用 8 位二进制表示,则  $\text{MAX}_i$  为 255,  $I(i, j)$  为显示图像在  $(i, j)$  处像素的亮度值,  $K(i, j)$  表示原始图像在  $(i, j)$  处像素的亮度值,  $mn$  表示图像分辨率.表 1

表 1 不同调制机制下仿真图片的 PSNR 以及 MSE 比较

Table 1 The PSNR and MSE comparison of different pictures under different modulation

Number	MSE		PSNR	
	GPWM	CGPWM	GPWM	CGPWM
1	612.15	2.035	20.262	45.045
2	1 039.7	1.362 8	17.962	46.723
3	972.81	2.214 1	18.251	44.679
4	2014.4	2.352 6	15.089	44.415
5	503.15	1.571 7	21.114	41.167
6	505.14	2.464 5	21.097	44.214
7	774.02	2.490 5	19.415	44.168
8	626.88	2.730 6	20.159	43.768
9	764.2	2.546 9	19.299	44.071
10	375.77	2.595 9	22.382	43.988
11	274.48	3.483 9	23.746	42.71
12	369.3	2.256 8	23.458	44.563
13	357.1	1.861 8	22.603	45.431
14	131.56	1.425 1	26.94	46.592
15	173.22	3.656 2	25.745	42.501
16	175.59	1.877 1	25.686	45.396
17	118.5	1.772 9	27.394	45.644
Average	396.07	2.364 1	23.002 9	44.170 2

列出了不同图像在 GPWM、CGPWM 方式下显示的数据对比,图 7(a)从左至右分别对应表 1 中编号 1、2、3、4 的图像,其余图像均取自柯达标准图像库 ISO12640-2,由于篇幅的限制显示效果略。

可见从图像质量角度,CGPWM 调制方式下的 PSNR、MSE 都较 GPWM 调制方式有明显的提高。

## 4 结 论

动态假轮廓是以 PWM 占空比实现亮度控制的显示器在显示动态画面时由于人眼的瞬时积分效应而形成的一种附加干扰,它严重影响了图像亮度变化的平滑性与图像的清晰度。本文在 GPWM 调制方法的基础上,针对 LED 显示屏,提出了一种新的脉宽调制方法——集中式脉宽调制。该方法将 PWM 周期中的小数场固定于周期的中间,然后计算整数权重位对应的子场数并将其紧邻小数场实现。理论分析和实验表明集中式脉宽调制法具有与线性 PWM 相似的点亮时间函数,能够将任意两灰度级间 DFC 指标的均值从 GPWM 方式下的 0.6 降为 0.2 以下。在有效消除 DFC 的同时又保持了 GPWM 的高刷新频率与高灰度级。取柯达标准图像库中 17 幅包含不同特征的图像进行实验与计算,GPWM 方式下显示图像的平均峰值信噪比从 23 提高到 44 左右,有效改善了图像的显示质量。

集中式脉宽调制法的实现不需要特殊芯片的支持,就可以在现有硬件设备上广泛应用,真实屏体上的实验经肉眼观察取得了良好效果。但由于 DFC 是光强累积在人眼中形成的虚假影像,难以通过电子采集设备记录、对比应用 DFC 消除法前后的 LED 显示屏图像显示质量。因此本文的后继工作还包括在真实的物理屏体上进行主观评估实验。另外,针对 DFC 问题,准确、有效的客观评价方法依然是显示领域中的一个重要研究内容。

### 参 考 文 献

- [1] ZHAO Xiao-ming, SHAO Xiao-peng, ZHANG Jian-qi, *et al.* Objective assessment of the color errors in RGB undersampled images based on color blending of multi-scale region [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, **34**(9): 2071-2077.  
赵小明, 邵晓鹏, 张建奇, 等. 基于多尺度区域混色的 RGB 欠采样图像颜色错误评价[J]. *电子与信息学报*, 2012, **34**(9): 2071-2077.
- [2] ZHOU Xiao-yuan, ZHANG Jian-qi, ZHAO Xiao-ming. Subpixel Sampling to the quality of LED displays [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(2): 0223001.  
周筱媛, 张建奇, 赵小明. 亚像素采样对 LED 显示器质量的提升[J]. *光子学报*, 2014, **43**(2): 0223001.
- [3] ZHANG Xiao-ning, LIANG Zhi-hu, LIU Chun-liang, *et al.* Image-dependent dynamic subfield coding optimization in color PDPs [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, **21**(3): 354-358.  
张小宁, 梁志虎, 刘纯亮, 等. 基于图像信息的彩色 PDP 动态子场编码优化方法[J]. *光电子·激光*, 2010, **21**(3): 354-358.
- [4] LIU Z, LIU C L, LIANG Z H. An adaptive subfield coding method for driving AC PDPs [J]. *IEEE Trans Actions on Plasma Science*, 2006, **34**(2): 397-402.
- [5] BIAN Jin-hong. Research on dynamic false contour in color plasma display panel [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2011, **34**(3): 261-264.  
卞金洪. 彩色等离子体显示屏中动态假轮廓问题的研究[J]. *电子器件*, 2011, **34**(3): 261-264.
- [6] WEITBRUCH S, VAN D. PDP picture-quality enhancement based on human visual system relevant features [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2001, **9**(4): 279-286.
- [7] HUANG Jin-fu, ZHANG Xiao-ning, WANG Yao-guo, *et al.* Adaptive unsymmetrical dither region to improvedynamic false contour in PDPs [J]. *Consumer Electronics*, 2010, **56**(4): 2027-2031.
- [8] LIU Zu-jun, LIU Chun-liang, LIANG Zhi-hu. An adaptive subfield coding method for driving AC PDPs [J]. *Consumer Electronics*, 2006, **34**(2): 397-402.
- [9] SVILAINIS L. LED Brightness control for video display application [J]. *Display*, 2008, **29**(1): 506-511.
- [10] SHI Tie-ling, LIANG Zhi-guo, WEI Wei, *et al.* Dynamic integral method for evaluating dynamic false contours of motion images in color plasma display panel [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.
- [11] ZHANG Xiao-ning, LIU Chun-liang. 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 动态假轮廓的评价方法——相对比值法 [J]. *液晶与显示*, 2006, **21**(2): 119-123.
- [12] KIM J W, KIM Y D, KANG S H, *et al.* A new measure of motion picture distortion and its applications to picture quality improvement on ac pdp [J]. *IEEE Trans on Consumer Electronic*, 2002, **48**(2): 275-283.
- [13] WANG Zhi-guo, LIU Chun-liang. A method of dynamic skin color correction applied to display devices [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, **21**(2): 187-191.  
王志国, 刘纯亮. 应用于显示器件的动态肤色校正方法 [J]. *光电子·激光*, 2010, **21**(2): 187-191.
- [14] ZHAO Z-quan, WANG Rui-guang, ZHENG Xi-feng, *et al.* Systemic accuracy analysis of LED displays based on visual perception [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, **27**(3): 234-331.  
赵梓权, 王瑞光, 郑喜凤, 等. 基于视觉感受的 LED 显示屏系统准确度分析 [J]. *液晶与显示*, 2012, **27**(3): 234-331.
- [15] KODAK. Kodak lossless true color image suite. ISO12640-2 [On-line]. Available; <http://r0k.us/graphics/kodak/>
- [16] LI Qi, FENG Hua-jun, XU Zhi-hai, *et al.* Digital image sharpness evaluation function [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(6): 736-738.  
李奇, 冯华君, 徐之海, 等. 数字图像清晰度评价函数研究 [J]. *光子学报*, 2002, **31**(6): 736-738.