

文章编号:1007-2780(2016)05-0442-07

# 灰度与亮度拟合对 LCD 面板 Mura 改善的影响

屠震涛<sup>1</sup>,樊 瑞<sup>1</sup>,张小宁<sup>1\*</sup>,梁志虎<sup>1</sup>,黄泰钧<sup>2</sup>,梁鹏飞<sup>2</sup>,王利民<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学 电子与信息工程学院 电子物理与器件教育部重点实验室, 陕西 西安 710049;  
2. 深圳市华星光电技术有限公司, 广东 深圳 518132)

**摘要:**选择有限的采样灰度级准确拟合出整个灰度区间的亮度和灰度关系,是影响 LCD 面板 Mura 改善效果、实时性和成本的关键因素。通过迭代方法优化采样灰度级,并采用分段伽马拟合方法研究了采样灰度级对 Mura 改善的影响。针对 1 920×1 080 的 55 inTFT-LCD 模组,6 个采样灰度级的优化使拟合亮度曲线与实际亮度曲线的相对误差之和在 0~255 灰度级从 5.64 降到 3.68,4 个采样灰度级的优化使相对误差之和从 29.27 降到 8.98。通过对 6 个和 4 个优化采样灰度级的实验结果比较和分析,结果表明,4 个优化采样灰度级可以在 Mura 改善效果、实时性及成本三者之间达到较好的平衡。

**关 键 词:**液晶显示屏;Mura 缺陷;分段伽马拟合  
**中图分类号:**TN27; TN702      **文献标识码:**A      **doi:**10.3788/YJYXS20163105.0442

## Influence of fitting curve between grayscale and brightness on Mura improvement of LCD panel

TU Zhen-tao<sup>1</sup>, FAN Rui<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-ning<sup>1\*</sup>, LIANG Zhi-hu<sup>1</sup>,  
HWANG Tai-jiun<sup>2</sup>, LIANG Peng-fei<sup>2</sup>, WANG Li-min<sup>2</sup>

(1. *Key Laboratory of Physical Electronics and Devices of the Ministry of Education, School of Electric and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;*  
2. *Shenzhen China Star Optoelectronics Technology Co., Ltd., Shenzhen 518132, China*)

**Abstract:** It is a key issue to select limited sampled grayscales to fit the curve accurately between the luminance and whole grayscales that affect the Mura improvement, real time, and cost of LCD panels. The limited sampled grayscales were optimized by the iterative method, and the influence of the optimized grayscales on the Mura improvement was investigated by the segmented gamma fitted method. To a 55 in TFT-LCD module with resolution of 1 920×1 080, the relative error in 0~255 grayscale between fitting and actual brightness curve decreases from 5.64 to 3.68 with optimization of six sampled grayscales and from 29.27 to 8.98 with optimization of four sampled grayscales. The experimental results of six and four optimized sampled grayscales on the mura improvement indicates that the mura improvement effect, real-time, and cost of LCD panels by using four optimized sampled grayscales are better.

收稿日期:2016-01-14;修订日期:2016-01-31.

基金项目:国家自然科学基金(No. 61372018)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61372018)

\* 通信联系人, E-mail: znn@mail. xjtu. edu. cn

**Key words:** LCD; Mura defect; segmented gamma fitting

1 引 言

随着显示尺寸的增加,LCD(Liquid crystal display)在生产制造过程中出现 Mura 的几率大大增加<sup>[1]</sup>。Mura 指的是显示器在显示某一灰度级时的亮度不均匀或色度不均匀的现象。它具有对比度低、亮度不均匀、边缘模糊、形状不确定等特点<sup>[2-4]</sup>。Mura 缺陷是一种典型的非电气类缺陷,成因多种多样<sup>[5-7]</sup>,生产环境中的粉尘杂质、液晶盒厚度不均一、滤光膜滤光效果不均一、背光源照射不均一等都会造成 Mura 缺陷。近年来对于显示屏的研究侧重于满足人的视觉偏好<sup>[8]</sup>,因此需要研究改善 Mura 缺陷。对于改善 Mura 缺陷的研究,大多是从 LCD 面板的制作工艺着手,如研究隔垫物密度对于 Push Mura 的改善<sup>[9]</sup>。目前图像处理技术主要是应用于对 Mura 缺陷进行机械检测<sup>[10-11]</sup>而尚未应用于 Mura 缺陷补偿。对于改善制造工艺无法完全的消除 Mura 缺陷,本文提出了将图像处理技术应用于 Mura 缺陷的改善。

本论文研究的图像处理方法改善 Mura 缺陷主要是使 Mura 缺陷区和背景区过渡平滑,使得人眼不易察觉出两者的亮度差异。因此需要准确地知道灰度与亮度的关系,从而通过改变像素点的灰度级来改变其亮度值。若采用灰度与显示屏亮度的实际关系曲线,需要测量全屏所有灰度级的亮度值。考虑到生产制造过程中实时性以及存储空间的要求,本文根据实际灰度与亮度关系曲线,并与 Gamma 曲线比较,确定了分段 Gamma 拟合方法。研究了通过迭代优化选取采样灰度级以及采样灰度级对于 Mura 缺陷改善效果的影响。通过对 6 个和 4 个采样灰度级的优化,得到更好的拟合效果。结果表明,在同时考虑 Mura 缺陷的改善效果、实时性以及资源占用情况时,优化后采样 4 个灰度级的分段 Gamma 拟合曲线可以达到预期的拟合效果,实现对 Mura 缺陷的有效改善。

2 灰度与亮度关系曲线的拟合

2.1 Mura 缺陷补偿

图像处理方法改善 Mura 主要是通过对全屏

各像素点在不同灰度级的亮度值进行适当的补偿,从而使人眼难以识别出 Mura 区域和正常区域,具体的补偿步骤如图 1 所示。首先通过滤波的方法对采集的图像进行预处理。考虑到在显示屏生产制造过程中对于测量时间和数据存储容量的要求,采样部分像素点中典型灰度级的亮度数据,拟合出灰度与亮度关系曲线。为了使 Mura 缺陷区和背景区过渡平滑,人眼不易察觉出两者的亮度差异,首先对采样像素点的亮度数据滤波获得新的亮度数据,该亮度数据即为目标校正亮度数据。结合灰度与亮度拟合曲线,偏移采样像素点的灰度级来达到目标校正亮度。计算出偏移的灰度级即补偿灰度,将采样像素点的补偿灰度存储在 FPGA 的存储器中,利用双线性插值的方法计算出其余像素点的补偿灰度,对全屏进行补偿。

在图 1 的 Mura 补偿步骤中,灰度和亮度的拟合对生产中的实时性和成本的影响显著,采用分段伽马拟合的方法,用较少的采样灰度级就可以达到较好的拟合效果。在确定了采样灰度级数目之后,对采样灰度级逐个优化,将规定数目的所有采样灰度级优化一遍为迭代一次,通过多次迭代的方法搜寻到最优化的采样灰度级。用 0~255 灰度级实际亮度曲线与拟合亮度曲线的相对误差之和来反映拟合的效果。

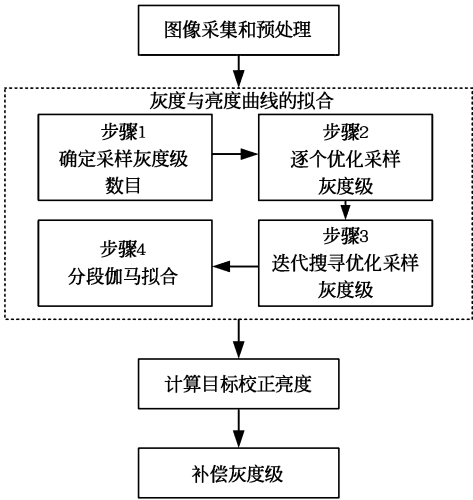


图 1 Mura 缺陷补偿步骤

Fig. 1 Mura defect compensation scheme

2.2 分段伽马拟合方法

2.2.1 分段伽马拟合原理

用图像处理方法改善 Mura 缺陷时需要准确知道灰度与亮度的关系,但若在此过程中对全屏所有像素 256 个灰度级的亮度值均进行采集,无法达到生产实时性的要求,且成本会增加。因此在 256 个灰度级中采样有限的灰度级来拟合出灰度与亮度的关系曲线。在拟合过程中重要的是拟合方法的确定以及如何优化选取采样灰度级,从而使全屏 0~255 灰度级实际亮度曲线与拟合亮度曲线的相对误差最小。

LCD 的灰度与亮度的关系符合  $\gamma$  曲线,通过全屏多数像素点的实际亮度曲线与  $\gamma$  曲线进行比较,发现用单一  $\gamma$  值的  $\gamma$  曲线对 0~255 灰度级的实际灰度与亮度关系曲线进行拟合时效果较差,但在不同灰度级区间用不同  $\gamma$  值,即分段  $\gamma$  拟合时效果较好。也就是说,分段  $\gamma$  拟合是将 0~255 灰度级根据采样灰度级划分成不同的灰度级区间,每个灰度级区间上用同一  $\gamma$  曲线拟合, $\gamma$  值由该灰度级区间的两个端点灰度级的亮度值确定,具体  $\gamma$  曲线的计算见式(1)和(2):

$$\gamma = \lg\left(\frac{L_{G_1}}{L_{G_2}}\right) / \lg\left(\frac{G_1}{G_2}\right), \quad (1)$$

$$L_f(G) = L_{G_2} \times \left(\frac{G}{G_2}\right)^\gamma, \quad (2)$$

其中: $L_{G_1}$  和  $L_{G_2}$  分别为采样灰度级  $G_1$  和  $G_2$  对应的亮度, $L_f(G)$  是  $G$  灰度级的拟合亮度值。通过式(1)计算出每一区间的  $\gamma$  值,再通过式(2)计算由采样灰度级  $G_1$  和  $G_2$  确定的灰度级区间的拟合  $\gamma$  曲线。

2.2.2 采样灰度级的优化

根据确定的采样灰度级数目  $k$ ,在 0~255 灰度级可以排列组合出多种采样灰度级选取方法,选取拟合亮度曲线与实际亮度曲线误差最小的采样灰度级为最优采样灰度级。考虑到人眼对相对亮度敏感的特性,最优采样灰度级选取的标准为:实际亮度和拟合亮度的相对误差在 0~255 灰度级之间的和  $E$  最小,如式(3)所示:

$$E_m = \sum_{G=0}^{255} \left| \frac{L_f(G) - L_a(G)}{L_a(G)} \right|, \quad (3)$$

其中: $E_m$  表示在搜寻第  $m$  个采样灰度级时实际亮度值和拟合亮度值在 0~255 灰度级的相对误差之和。 $m$  的取值范围为 1 到  $k$ 。 $L_a(G)$  表示灰度

级为  $G$  时实际的亮度值, $L_f(G)$  表示灰度级为  $G$  时通过公式(2)计算得到的拟合亮度值。 $E_m$  由搜寻范围内相对误差之和和搜寻范围外相对误差之和两部分构成,搜寻范围内相对误差之和可以用  $I_m$  表示。

优化选取采样灰度级的迭代过程如图 2 所示。将所有采样灰度级逐个优化选取一遍为迭代一次,用  $G_m^n$  表示在迭代第  $n$  次时第  $m$  个采样灰度级。在确定了采样灰度级的数目  $k$  之后,首先分别给采样灰度级  $G_1^0$  到  $G_k^0$  赋初始灰度值,之后逐个优化这  $k$  个采样灰度级。优化时先移动一个采样灰度级,固定其余采样灰度级。每个采样灰度级的搜寻范围为相邻采样灰度级构成的灰度级区间,即在  $G_2^0$  到  $G_4^0$  之间搜寻优化的第 3 个采样灰度级  $G_3^1$ 。由于采用分段  $\gamma$  拟合,通过式(1)可知,当  $G_3^1$  移动时会使得  $G_2^1$  到  $G_3^1$  以及  $G_3^1$  到  $G_4^1$  灰度区间的  $\gamma$  值发生变化,即  $G_3^1$  搜寻范围内的相对误差之和  $I_m$  会发

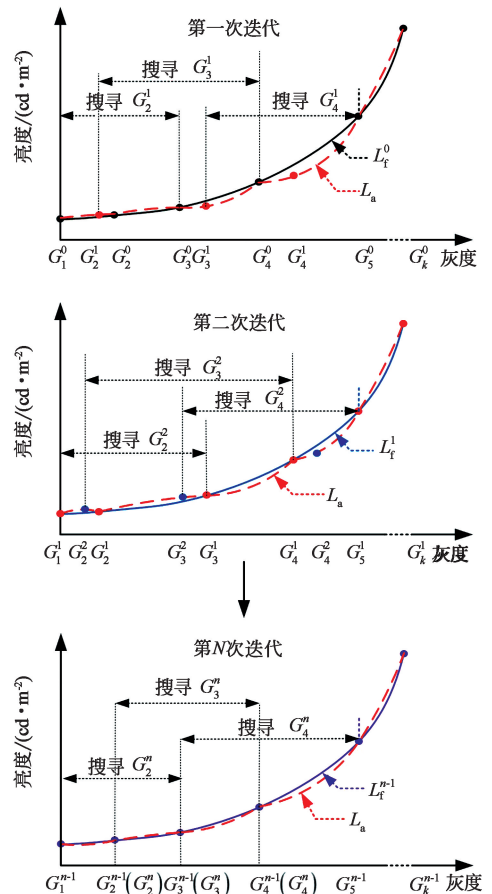


图 2 采样灰度级迭代优化算法

Fig. 2 Iterative optimization algorithm of sampled grayscales

生变化,而  $G_3^1$  搜寻范围外的相对误差之和是固定不变的,选取  $G_3^1$  为在其搜寻范围内移动时使  $E$  取得最小值相对应的灰度级。在优化选取了  $G_3^1$  之后,在  $G_3^1$  到  $G_5^0$  之间优化选取  $G_4^1$ ,依次类推优化选取出  $k$  个采样灰度级。

通过初始采样灰度级  $G_1^0$  到  $G_k^0$  拟合出的亮度曲线为  $L_f^0$ ,在迭代一次后,采样灰度级变为  $G_1^1$  到  $G_k^1$ ,拟合亮度曲线为  $L_f^1$ 。在迭代过程中  $E$  的变化如图 3 所示,在图中  $N$  表示优化选取的次数,在每次迭代过程中,优化选取后一个采样灰度级  $G_{m+1}$  是在优化选取了前一个采样灰度级  $G_m$  的基础上,但  $E_{m+1}$  不一定比  $E_m$  小,由于在第  $m+1$  个采样灰度级移动时会使之前达到的  $I_m$  发生变化,在  $I_{m+1}$  达到最小值时, $I_m$  此时不一定处在最小值处,即无法比较  $E_{m+1}$  和  $E_m$ 。但通过迭代的方法可以确保在确定采样灰度级数目时选取到最优化的采样灰度级,每迭代一次,确定数目的采样灰度级选取方式变化的趋势是使得  $E$  变小。当后一次迭代后采样灰度级的选取方式与前一次迭代后采样灰度级的选取方式一样时,说明此时的采样灰度级方法为最优化的采样方法,即通过  $n$  次迭代使得  $E$  取得确定采样灰度级数目时的最小值,此时拟合亮度曲线为  $L_f^n$ 。

2.2.3 6 个采样灰度级的优化

在利用分段  $\gamma$  拟合的方法拟合灰度与亮度关系曲线时,考虑到生产中的实时性要求,在保证 Mura 缺陷改善效果的基础上选取尽可能少的采样灰度级。由于实际灰度与亮度关系曲线在高灰度级趋向于单一  $\gamma$  值的  $\gamma$  曲线,故在高灰度级可以选取较少的采样灰度级。而在低灰度级选取的采样灰度级间隔较小,即采样较频繁以保证较好的拟合效果。在通过实际灰度与亮度曲线与不同  $\gamma$  值的  $\gamma$  曲线的比较,在 0~255 灰度级采样 6 个灰度级即分成 5 个灰度级区间。如图 4 所示,在最优化选取采样灰度级的计算过程中,设采样的灰度级依次为  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$ 、 $G_4$ 、 $G_5$ 、 $G_6$ ,其中考虑到屏幕的漏光将  $G_1$  固定为 0 灰度级,并且为确保高灰度级的亮度值将  $G_6$  固定为 255 灰度级。需要通过迭代的方法搜寻到最优化的  $G_2^n$ 、 $G_3^n$ 、 $G_4^n$ 、 $G_5^n$  灰度级,首先分别给  $G_2$ 、 $G_3$ 、 $G_4$ 、 $G_5$  一个初始灰度级,可以选取  $2^n$  灰度级,即分别为 16、32、64、128 灰度级。选取采样灰度级为在其移动范围内搜寻到  $I_m$  达到最小所对应的灰度级。多次搜寻直到

$G_2$ 、 $G_3$ 、 $G_4$ 、 $G_5$  不再发生变化时得到采样 6 个灰度级的最优化采样方式。

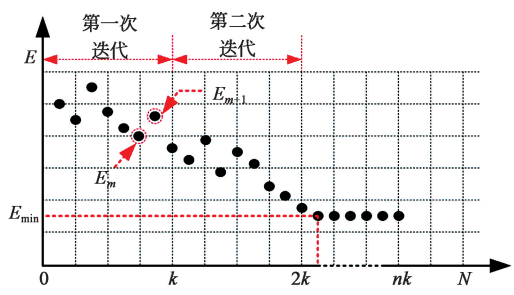


图 3 采样灰度级迭代优化结果示意图

Fig. 3 Results of iteration optimization of sampled grayscales

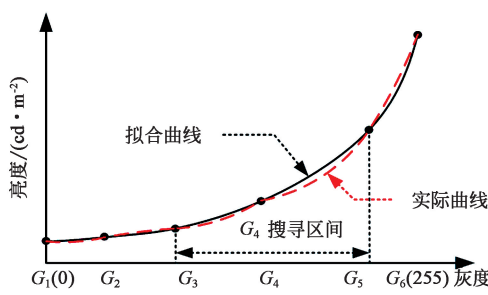


图 4 采样 6 个灰度级优化算法示意图

Fig. 4 Optimization algorithm of sampled six grayscales

2.2.4 4 个采样灰度级的优化

不考虑 0 灰度级的漏光时,不固定 0 和 255 灰度级,可以进一步减少采样灰度级数量至 4 个,在采样 4 个灰度级时设采样的灰度级依次为  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$ 、 $G_4$ ,由于此时采样灰度级较少,直接移动  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$ 、 $G_4$  寻找到使 0~255 灰度级相对误差之和最小的采样方式。在计算过程中也需要分别给  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$ 、 $G_4$  一个初始的灰度级。为计算方便令其分别为 16、32、64、128。与采样 6 个灰度级时相同,即每次固定采样 4 个灰度级中的 3 个灰度级,只移动一个灰度级。 $G_4$  灰度级的搜寻范围为  $G_3+1$  到 255 灰度级, $G_3$  灰度级的搜寻范围为  $G_2+1$  到  $G_4-1$ , $G_2$  灰度级的搜寻范围为  $G_1+1$  到  $G_3-1$ , $G_1$  的搜寻范围为 0 到  $(G_2-1)$ 。多次搜寻直到  $G_1^n$ 、 $G_2^n$ 、 $G_3^n$ 、 $G_4^n$  基本不变,得到最优化的采样 4 个灰度级的采样选取方法。

对于实验中使用的 1 920×1 080 的 55 in(1 in=2.54 cm) TFT-LCD 模组,计算出的 6 个和 4 个优化采样灰度级分别为 0,12,31,78,111,255

和 11,29,111,166 灰度级。通过计算拟合灰度与亮度关系曲线与实际亮度曲线在 0~255 灰度级的相对误差之和评价拟合的效果,在表 1 中比较了初始选取的采样灰度级与优化后采样灰度级的拟合结果,通过  $E$  值可以看出,采样 4 个灰度级初始选取的灰度级拟合效果较差,通过迭代优化选取的 6 个和 4 个采样灰度级比初始选取的采样灰度级拟合效果好,优化后采样 4 个灰度级的相对误差之和与采样 6 个灰度级相差不大。

表 1 不同采样方法的相对误差之和

Tab. 1 Sum of the relative error with different sample method

| 灰度级数量 | 采样方法 | 采样灰度级                   | $E$   |
|-------|------|-------------------------|-------|
| 6     | 初始   | 0, 16, 32, 64, 128, 255 | 5.64  |
|       | 优化   | 0, 12, 31, 78, 111, 255 | 3.68  |
| 4     | 初始   | 16, 32, 64, 128         | 29.27 |
|       | 优化   | 11, 29, 111, 166        | 8.98  |

3 拟合结果与讨论

灰度与亮度关系曲线拟合是图像处理改善 Mura 缺陷的基础,对灰度与亮度关系曲线拟合的评价主要通过对 Mura 缺陷改善效果的主观和客观评价来体现。主观评价是通过人眼来主观感知对于 Mura 缺陷的改善效果。考虑到在采样灰度级处拟合曲线的亮度值与实际亮度曲线的亮度值一致,在比较拟合曲线对于 Mura 缺陷改善效果的影响时选取非采样灰度级。图 5 为选取灰度级 24,35,48,86 比较 6 个优化采样灰度级与 4 个优化采样灰度级对 Mura 缺陷改善的效果。在不告知观察者图像展示顺序的情况下,让其比较图像的显示效果。10 个观察者均认为改善 Mura 缺陷后的图像显示效果较好,且采样 6 个和 4 个灰度级对 Mura 缺陷改善效果相近,无法明显区分。从主观效果来看,采样 4 个灰度级的拟合曲线可以保证较好的 Mura 缺陷改善效果。

客观评价是使用彩色分析仪 CA-2000 采集上述灰度的补偿前后图像,根据式(4)计算出 Mura 指数,Mura 指数越小则 Mura 缺陷的改善

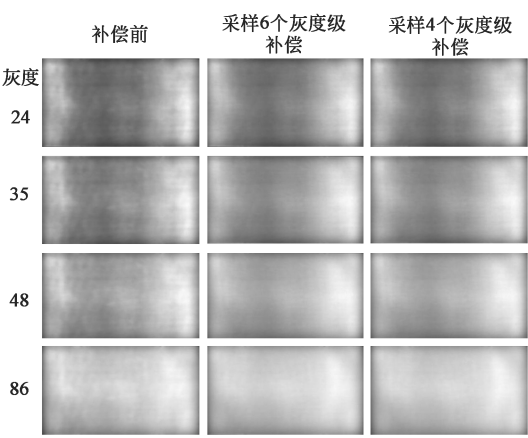


图 5 6 个和 4 个优化采样灰度级对 Mura 改善的比较  
Fig. 5 Comparison of improvements of Mura defects with sampled six and four optimized grayscales

效果越好。具体算法为对全屏分别取等间距的 100 条横线和 190 条竖线进行分析,对横、纵共 290 条线上所有 Mura 的 Mura 指数进行统计,取其中最大的 100 个 Mura 指数的平均值作为全屏 Mura 指数。首先对采样数据进行低通滤波,模拟人眼的实际观察曲线,然后对图像采用大模版的均值滤波来模拟不存在 Mura 缺陷的效果。认为实际观察曲线与拟合曲线相邻的两交点之间的区域为 Mura 区域。Mura 指数的计算需要考虑到 Mura 缺陷区域的相对亮度和 Mura 缺陷区域的长度,相对亮度越小,人眼越不易察觉,Mura 缺陷区域越长,亮度的变化越缓慢,人眼越不易察觉。

$$M_1 = 10^5 \times \frac{\Delta L_{\max}}{L_{\text{avg}} \times d}, \tag{4}$$

其中:Mura 指数  $M_1$  表示补偿前后 Mura 区域的相对亮度差异的分布。Mura 指数的大小和人眼对亮度的视觉特性相一致, $M_1$  越大,则 Mura 现象越严重。 $d$  为 Mura 区域的宽度, $\Delta L_{\max}$  为补偿前后 Mura 区域内的最大亮度差异, $L_{\text{avg}}$  为 Mura 补偿前全屏的平均亮度。表 2 比较了灰度级为 24,35,48,86 时 Mura 改善前和用上述 6 个和 4 个优化前后采样灰度级改善后的 Mura 指数。

根据表 2 可以看出利用 4 个优化采样灰度级补偿后 Mura 指数与 6 个优化采样灰度级补偿后 Mura 指数相差不大,即从客观分析,采样 4 个灰度级拟合时可以保证较好的 Mura 缺陷改善效果。在 24 和 48 灰度级 6 个优化采样灰度级补偿

表 2 采用 6 个和 4 个优化后采样灰度级的 Mura 改善前后的指数

Tab. 2 Mura index before and after compensation with optimized of six or four grayscales

| Mura 指数( $10^{-4}$ ) | 灰度级  |      |      |      |
|----------------------|------|------|------|------|
|                      | 24   | 35   | 48   | 86   |
| 补偿前                  | 3.66 | 3.37 | 2.92 | 2.08 |
| 6 个优化采样灰度级<br>补偿后    | 0.93 | 1.53 | 1.17 | 0.92 |
| 4 个优化采样灰度级<br>补偿后    | 1.60 | 1.49 | 1.18 | 0.89 |

后 Mura 指数比 4 个小,而在 35 和 86 灰度级 4 个优化采样灰度级补偿后 Mura 指数比 6 个小,可以看出 4 个和 6 个优化采样灰度级对 Mura 的改善效果相似。结合表 1,通过迭代的过程优化采样灰度级可以使得拟合曲线与实际曲线在 0~255 灰度级的相对误差之和最小,使拟合效果比优化前好。综合主客观对于 Mura 改善效果的比较,4 个优化采样灰度级可以在保证较好的 Mura 缺陷改善效果的基础上节约成本并满足实时性的

要求。因此在拟合灰度与亮度关系曲线时,采样灰度级的数量可以减少到 4 个。

4 结 论

本文研究图像处理改善 Mura 缺陷时通过计算选取不同采样灰度级时 0~255 灰度级相对误差之和来优化采样灰度级。选取有限的采样数据拟合 LCD 模组灰度与亮度关系曲线,通过比较实际灰度与亮度关系曲线与不同  $\gamma$  值的  $\gamma$  曲线,确定了分段伽马拟合方法。对于实验采用的 1 920×1 080 的 55 inTFT-LCD 模组,通过迭代的方法选取出最优化的 6 个采样灰度级分别为 0,12,31,78,111,255 灰度级。考虑到实时性和成本,进一步研究了采样 4 个灰度级的最优化选取方法,通过迭代优化的选取出 11,29,111,166 灰度级。从主客观方面比较了 6 个和 4 个优化采样灰度级的拟合灰度与亮度关系曲线对 Mura 缺陷改善效果的影响。结果表明,在综合考虑对 Mura 缺陷改善效果的影响,实时性和成本时,采样灰度级的数量可以减少到 4 个。

参 考 文 献:

[1] PARK N K, YOO S I. Evaluation of TFT-LCD defects based on human visual perception [J]. *Displays*, 2009, 30 (1): 1-16.

[2] 毕昕,丁汉. TFT-LCD Mura 缺陷机器视觉检测方法[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(12): 13-19.  
BI X, DING H. Machine vision inspection method of Mura defect for TFT-LCD [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(12): 13-19. (in Chinese)

[3] 李坤,李辉,刘云杰,等. LCD Mura 缺陷的 B 样条曲面拟合背景抑制[J]. *光电工程*, 2014, 41(2): 33-39.  
LI K, LI H, LIU Y J, *et al.* Background suppression of LCD mura defect using B-spline surface fitting [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, 41(2): 33-39. (in Chinese)

[4] 王新新,徐江伟,邹伟金,等. TFT-LCD 缺陷检测系统的研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2014, 28(3): 278-284.  
WANG X X, XU J W, ZOU W J, *et al.* Research on detection system for TFT-LCD defects [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2014, 28(3): 278-284. (in Chinese)

[5] LEE Y H, TANG K H. How human perceptions of Mura affect LCD market values [J]. *Displays*, 2012, 33(1): 46-53.

[6] 张昱,张健. 模糊专家系统在 TFT-LCD 缺陷检测中的应用[J]. *光电子激光*, 2006, 17(6): 719-723.  
ZHANG Y, ZHANG J. Application of fuzzy expert system in defect inspection of TFT-LCD [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2006, 17(6): 719-723. (in Chinese)

[7] 京东方科技集团股份有限公司. TFT-LCD 像素电极层结构、制备方法及其掩膜版: 中国, 201110095453[P]. 2011-08-31.  
BOE Technology Group Limited by Share Ltd. TFT-LCD pixel electrode layer structure, preparation method and mask; CN, 201110095453[P]. 2011-08-31. (in Chinese)

[8] LEE H, WHANG K W. A quantitative measurement of LCD and PDP TVs for human visual preference and fatigue [J]. *Displays*, 2012, 33(1): 1-6.

[9] 程石,王涛,张敏,等. TFT-LCD 中隔垫物密度与 Push Mura 和低温气泡的关系[J]. *液晶与显示*, 2011, 26(5): 604-607.

CHENG S, WANG T, ZHANG M, *et al.* Relationship of spacer density with Push Mura and cold bubble in TFT-LCD [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(5): 604-607. (in Chinese)

[10] CHEN H C, FANG L T, LEE L, *et al.* LOG-filter-based inspection of cluster Mura and vertical-band Mura on liquid crystal displays[C]. *Proceedings of the SPIE, Machine Vision Applications in Industrial Inspection XIII*, 257, San Jose, CA: SPIE, 2005, 5679: 257-265.

[11] CHEN S L, CHANG J H. TFT-LCD Mura defects automatic inspection system using linear regression diagnostic model [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2008, 222(11): 1489-1501.

**作者简介:** 屠震涛(1976—),男,陕西西安人,讲师,硕士,主要从事显示驱动电路和图像处理方面的研究。E-mail: tuzhentaotao@mail.xjtu.edu.cn

樊瑞(1993—),女,宁夏石嘴山人,硕士研究生,主要从事平板显示图像处理和驱动技术的研究。E-mail: fanrui@stu.xjtu.edu.cn

张小宁(1972—),男,陕西汉中,教授,博士,主要从事显示驱动电路、图像处理以及发光器件制备、驱动方面的研究。E-mail: znn@mail.xjtu.edu.cn