

前置逐点亮度修正处理算法*

郝亚茹¹, 邓招奇¹, 严飞²

(1. 电子科技大学中山学院, 广东 中山 528402;
2. 南京信息工程大学信息与控制学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 逐点校正算法为基础, 提出一种完全独立于显示控制系统的前置处理方案。该处理方案以 DVI 接口为传输介质, 可完成对任意分辨率、任意格式的图像信息的亮度逐点校正。在现有逐点校正模型的基础上, 实现前置处理方案中的亮度修正算法模型; 根据算法模型中校正参量的聚集特性, 同时采用压缩校正参量取值范围的方法和数值重组的方式来提高 SDR SDRAM 的频率, 据此设计的数字电路可以实现对任意分辨率、任意传输格式的数据进行逐点亮度校正功能; 通过理论和定量计算以及实际观测前置法和后置法的应用效果, 得出结论: 前置法产生的不一致性的灰度级数大于后者, 并且灰度级越低, 校正的不一致性越差, 但前置法的灵活性和通用性明显优于后置法。

关键词: 前置处理器; DVI 传输格式; 压缩取值; 数值重组

中图分类号: TN27; TN702 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2017)02-0080-08

The preprocessing algorithm for point by point luminance correction

HAO Yaru¹, DENG Zhaoqi¹, YAN Fei²

(1. University of Electronic Science and Technology of China, Zhongshan Institute, Zhongshan 528402, China;

2. School of Information and Control, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Based on the brightness correction algorithm, a pre-processor scheme is proposed. The processor can realize the function of point by point correction for image data of arbitrary resolution and arbitrary transmission format. The pre-processor is completely independent of the display control system. Firstly, the model of point by point luminance correction algorithm is introduced. On the basis of the model, the model of point by point correction algorithm which is used to the pre-processor is derived. Then the design structure of the current hardware condition is analyzed based on this model, which mainly to SDRAM SDR frequency as the bottleneck analysis, According to the aggregation characteristics of the correction parameters, the method and numerical reconstruction of the range of compression correction parameters are adopted. The frequency of SDR SDRAM was indirectly improved. The data of any resolution and arbitrary transmission format can be handled by the point by point correction technology which is in the pre-processor. Finally, The application effect of pre method and post method is analyzed. It is concluded that the effect of pre method is worse than that of the post method, especially on the performance

* 收稿日期: 2016-07-11

基金项目: 国家自然科学基金(61605083); 中山市社会公益科技项目(2016B2145); 电子科技大学中山学院青年基金项目(415YJ04); 电子科技大学中山学院科研启动项目(415YKQ05)

作者简介: 郝亚茹(1981年生), 女; 研究方向: 全彩LED显示屏的控制系统以及亮、色度校正等相关技术; E-mail: 165689908@qq.com

通信作者: 邓招奇(1981年生), 男; 研究方向: 全彩LED显示屏软件控制及色度学理论; E-mail: 53962791@qq.com

of low gray level uniformity. The flexibility and versatility of the prefix method is superior to the post method.

Key words: pre-processor; DVI transport format; compression value; numerical recombination

目前，逐点亮度校正技术的应用越来越广泛，并且逐渐趋于成熟。但是，逐点校正技术主要是嵌入到 LED 显示屏的控制系统中。对于未采用校正技术 LED 显示屏，需要将控制系统整体更新，才能使显示屏在整个生命周期内的一致化效果达到最优。以上的更新方法对于面积较小且安装位置便于人工操作的显示屏而言，其工作量还可以接受。但是，对于面积大且安装位置难以进行操作的显示屏，系统更新的工作量将呈指数级增长。针对上述问题，本文提出一种具有逐点亮度校正功能的前置处理器的设计方案，该处理器使用 DVI 接口对图像数据进行传输^[1-3]，并且兼容 DVI 接口可承受的任意分辨率、任意传输格式。该处理器的使用和操作极其简便，只要将前置处理器的输入端连接主机 DVI 的输出端，前置处理器的输出端连接控制系统的 DVI 输入端，就能保证高灰度显示屏的均匀性和清晰度，避免了整体更新显示控制系统的繁琐操作。

1 现有亮度校正算法理论

LED 显示屏上显示的图像源于计算机，并通过 DVI 接口将图像信息传输到 LED 显示控制系统。源于计算机的图像数据称为原始图像数据值由 OID 表示^[4-6]，如果直接显示到 LED 显示屏，则无法还原图像的真彩色，所以，需要对原始图像数据进行反伽马变换，变换后的数据值由 SID 表示，其变换公式为：

$$SID = 16\ 383 \times \left(\frac{OID}{255}\right)^\gamma$$

扫描到 LED 显示屏上数据值为 SID，对 LED 显示屏上各个显示灰度（详见文献 [7]）的亮度值采集，可得到 SID 和亮度值以及 OID 和亮度值的关系曲线，如图 1 和 2 所示。

从图 1 和 2 可见，SID 值与光强度值（亮度值）呈现正比函数关系，OID 值与光强度值（亮度值）呈指数关系且指数值为 γ 。这是将现有亮度校正算法转换到前置处理方案中的事实根据。

LED 显示屏上的各个发光二极管的亮度值之差过大会使显示不一致，根据色度学原理可以将所有不同的色域空间都校准到同一个色域空间^[8-10]，该空间称为标准色域空间，其由 (1) 式表示。

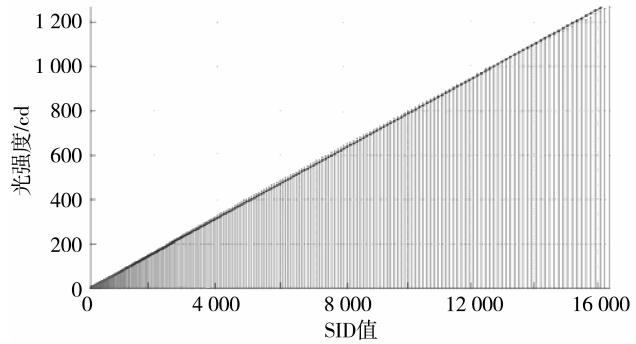


图 1 SID 值与光强度值关系曲线

Fig. 1 Relationship between SID value and light intensity

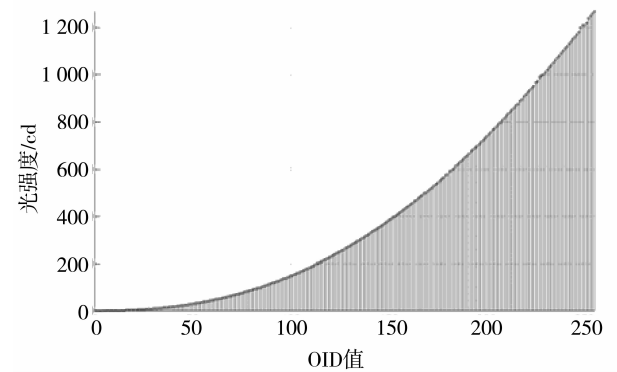


图 2 OID 值与光强度值关系曲线

Fig. 2 Relationship between OID value and light intensity

$$\begin{cases} X_{rst} = C_{r-rst}x_{r-rst}R + C_{g-rst}x_{g-rst}G + C_{b-rst}x_{b-rst}B \\ Y_{rst} = C_{r-rst}y_{r-rst}R + C_{g-rst}y_{g-rst}G + C_{b-rst}y_{b-rst}B \\ Z_{rst} = C_{r-rst}z_{r-rst}R + C_{g-rst}z_{g-rst}G + C_{b-rst}z_{b-rst}B \end{cases} \quad (1)$$

上式中 R, G, B 值表示的是 SID 值。 $C_{r-rst} C_{g-rst} C_{b-rst}$ 为标准显示系统三基色的系数， $x_{r-rst} y_{r-rst} z_{r-rst}$ 为该标准显示系统中基色 R 的色度坐标， $x_{g-rst} y_{g-rst} z_{g-rst}$ 为该标准显示系统中基色 G 的色度坐标， $x_{b-rst} y_{b-rst} z_{b-rst}$ 为该标准显示系统中基色 B 的色度坐标。

选取 LED 显示屏上任意一个像素点，将其对应的色域空间由 (2) 式表示作为被标准化对象。

$$\begin{cases} X_i = C_{(i,r)}x_{(i,r)}R + C_{(i,g)}x_{(i,g)}G + C_{(i,b)}x_{(i,b)}B \\ Y_i = C_{(i,r)}y_{(i,r)}R + C_{(i,g)}y_{(i,g)}G + C_{(i,b)}y_{(i,b)}B \\ Z_i = C_{(i,r)}z_{(i,r)}R + C_{(i,g)}z_{(i,g)}G + C_{(i,b)}z_{(i,b)}B \end{cases} \quad (2)$$

其中， R, G, B 同上， $C_{(i,r)}, C_{(i,g)}, C_{(i,b)}$ 表示了 (R) (G) (B) 三原色的分量系数， $x_{(i,r)}, y_{(i,r)}, z_{(i,r)}$ 为

(R) 基色的色度坐标, $x_{(i,g)}$ 、 $y_{(i,g)}$ 、 $z_{(i,g)}$ 为 (G) 基色的色度坐标, $x_{(i,b)}$ 、 $y_{(i,b)}$ 、 $z_{(i,b)}$ 为 (B) 基色的色度坐标。

只存在亮度偏差的显示屏, 非标准像素点的红、绿、蓝的色坐标值与标准点的红、绿、蓝的色坐标值相等, 即在 (1) 和 (2) 式中参量 $x_{r-rst} = x_{(i,r)}$, $y_{r-rst} = y_{(i,r)}$, $x_{g-rst} = x_{(i,g)}$, $y_{r-rst} = y_{(i,r)}$, $x_{b-rst} = x_{(i,b)}$, $y_{b-rst} = y_{(i,b)}$ 。被标准化像素点经转换后获得的三刺激值为 $(X_{(i,t)}, Y_{(i,t)}, Z_{(i,t)})$, 应分别等于标准系统的三刺激值 $(X_{rst}, Y_{rst}, Z_{rst})$, 由此恒等关系以及各参量关系可得转换方程如 (3) 式所示。

$$\begin{pmatrix} X_{(i,t)} \\ Y_{(i,t)} \\ Z_{(i,t)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{(i,r)}x_{(i,r)} & C_{(i,g)}x_{(i,g)} & C_{(i,b)}x_{(i,b)} \\ C_{(i,r)}y_{(i,r)} & C_{(i,g)}y_{(i,g)} & C_{(i,b)}y_{(i,b)} \\ C_{(i,r)}z_{(i,r)} & C_{(i,g)}z_{(i,g)} & C_{(i,b)}z_{(i,b)} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{C_{r-rst}}{C_{(i,r)}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{C_{g-rst}}{C_{(i,g)}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{C_{b-rst}}{C_{(i,b)}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中,

$$\mathbf{A}_{(i,L)} = \begin{pmatrix} \frac{C_{r-rst}}{C_{(i,r)}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{C_{g-rst}}{C_{(i,g)}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{C_{b-rst}}{C_{(i,b)}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{coef}_{(i,r)} & 0 & 0 \\ 0 & \text{coef}_{(i,g)} & 0 \\ 0 & 0 & \text{coef}_{(i,b)} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$\mathbf{A}_{(i,L)}$ 矩阵为被标准化像素点的转换矩阵, 主对角线上的 3 个参量为亮度转换参量。每个像素点都对应一个如 $\mathbf{A}_{(i,L)}$ 的对角矩阵。

2 前置处理器亮度校正算法

如第 1 部分所述, 亮度转换参量修正的是 SID 数值, 但在前置处理器中需要对 OID 值进行修正。源于主机的红、绿、蓝的 OID 值分别由 R_s 、 G_s 和 B_s 表示, 则红绿蓝三分量值 R 、 G 、 B 与 R_s 、 G_s 、 B_s 的关系表达式为:

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 16\,383 \times \left(\frac{R_s}{255}\right)^\gamma \\ 16\,383 \times \left(\frac{G_s}{255}\right)^\gamma \\ 16\,383 \times \left(\frac{B_s}{255}\right)^\gamma \end{pmatrix} \quad (5)$$

其中, LED 显示器中 γ 取值为 2.35。设定 $k = 16\,383 \times \left(\frac{1}{255}\right)^\gamma$, 则可将 (5) 式简化为 (6) 式。

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k(R_s)^\gamma \\ k(G_s)^\gamma \\ k(B_s)^\gamma \end{pmatrix} \quad (6)$$

将 (6) 式带入 (3) 式可得到 (7) 式。

$$\begin{pmatrix} X_{(i,t)} \\ Y_{(i,t)} \\ Z_{(i,t)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{(i,r)}x_{(i,r)} & C_{(i,g)}x_{(i,g)} & C_{(i,b)}x_{(i,b)} \\ C_{(i,r)}y_{(i,r)} & C_{(i,g)}y_{(i,g)} & C_{(i,b)}y_{(i,b)} \\ C_{(i,r)}z_{(i,r)} & C_{(i,g)}z_{(i,g)} & C_{(i,b)}z_{(i,b)} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{C_{r-rst}}{C_{(i,r)}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{C_{g-rst}}{C_{(i,g)}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{C_{b-rst}}{C_{(i,b)}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k(R_s)^\gamma \\ k(G_s)^\gamma \\ k(B_s)^\gamma \end{pmatrix} \quad (7)$$

对 (7) 式进行一步整理得到 (8) 式。

$$\begin{pmatrix} X_{(i,t)} \\ Y_{(i,t)} \\ Z_{(i,t)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{(i,r)}x_{(i,r)} & C_{(i,g)}x_{(i,g)} & C_{(i,b)}x_{(i,b)} \\ C_{(i,r)}y_{(i,r)} & C_{(i,g)}y_{(i,g)} & C_{(i,b)}y_{(i,b)} \\ C_{(i,r)}z_{(i,r)} & C_{(i,g)}z_{(i,g)} & C_{(i,b)}z_{(i,b)} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} k(\text{coef}_{(i,r)}^{1/\gamma} R_s)^\gamma \\ k(\text{coef}_{(i,g)}^{1/\gamma} G_s)^\gamma \\ k(\text{coef}_{(i,b)}^{1/\gamma} B_s)^\gamma \end{pmatrix} \quad (8)$$

在前置处理器中采用式 (8) 描述的算法可实现逐点亮度校正。校正过程为: 首先对 LED 显示屏上各个像素点的光强度值进行采集, 经标准化获得每个像素点的亮度转换参量 $\text{coef}_{(i,r)}$ 、 $\text{coef}_{(i,g)}$ 、 $\text{coef}_{(i,b)}$, 然后对每个转换参量进行 $1/\gamma$ 的指数变换获得 $\text{coef}'_{(i,r)}$ 、 $\text{coef}'_{(i,g)}$ 、 $\text{coef}'_{(i,b)}$, 最后由 $\text{coef}'_{(i,r)}$ 、 $\text{coef}'_{(i,g)}$ 、 $\text{coef}'_{(i,b)}$ 分别与 R_s 、 G_s 、 B_s 分量做乘积, 将乘积后的结果取整后通过 DVI 接口输出, 即完成前置处理方案中校正过程。

3 应用与分析

在前置处理器中实现的校正模型由 (8) 式表示。在模型实现过程中, 为了提高前置处理器的兼容性, DVI 信号需要采用即入即出的方式, 即将除了输入的图像数据经由 (8) 式处理外, 其他信号 (如行、场同步信号、时钟信号、DE 信号、控制信号等) 无处理且直接通过 DVI 接口输出 (为了保证与图像数据同步, 需要加几级延迟)。

在前置处理器的硬件设计中包括核心器件 FPGA 和 SDR SDRAM, 其中 FPGA 的工作频率可达到 300 MHz, SDR SDRAM 的工作频率最高达到 166 MHz。数据传输采用 DVI 接口, DVI 链路的最高点像素频率可达到 165 MHz (如果计算机设定的刷新率为最大值 $1\ 920 \times 1\ 080 \times 60$ 或者 $1\ 600 \times 1\ 200 \times 60$ Hz, 则 DVI 的传输频率达到最大值, 且等于 165 MHz)。为了保证行、场、时钟信号与被校正图像数据的同步, 图像数据的处理速度需要大于 165 MHz, 即单像素点的校正参量的读取速度需要大于 165 MHz。

转换参量 $\text{coef}'_{(i,r)}$ 、 $\text{coef}'_{(i,g)}$ 、 $\text{coef}'_{(i,b)}$ 的存储介质为 SDR SDRAM, 虽然其工作频率可达到 165 MHz, 但读写有效工作频率 f_e 一定小于 165 MHz^[11-14]。因此采用一个读有效时钟频率只读取一个像素点的校正参量值的方法, 校正参量的读出速度不可能大于 165 MHz, 即无法实现 DVI 接

口信号的兼容性和通用性。解决 SDR SDRAM 的读写有效频率是解决 DVI 传输速率兼容性的关键。

LED 显示屏每个像素点一般由同批次的发光二极管组成, 而同一批次 LED 发光二极管的亮度参量值都有相近性。图 3 为存在亮度差异的 LED 显示屏经采集后获得的亮度校正参量的分布图。

由图 3 可知, 红基色校正参量值集中分布在 0.8 ~ 0.9, 绿基色校正参量值集中分布在 0.75 ~ 0.93, 蓝基色的校正参量值集中分布在 0.7 ~ 0.9, 通过对多个显示屏上的校正参量值的分布统计得出, 虽然各个显示屏上的亮度校正参量值的分布区间范围有差异性, 但是, 各个显示屏上的红、绿、蓝 3 种基色的校正参量值都如图 3 中所示的聚集特性, 且校正参量的值的聚集区间为总区间的 25%, 即, 75% 区间的值为无效值, 所以可对量化后的校正参量值进行压缩处理, 然后重新组合压缩值以达到间接提高 SDR SDRAM 的读写效率的目的。

校正参量的压缩重组算法具体的实施过程为: 首先获得红基色的所有校正参量量化后的最小值, 表示为 $\text{coef}'_{(r,\min)} = \text{MIN}(\text{coef}'_{(0,r)}, \dots, \text{coef}'_{(i,r)}, \dots, \text{coef}'_{(n,r)})$, 绿基色的所有校正参量量化后的最小值, 表示为 $\text{coef}'_{(g,\min)} = \text{MIN}(\text{coef}'_{(0,g)}, \dots, \text{coef}'_{(i,g)}, \dots, \text{coef}'_{(n,g)})$, 蓝基色对应的亮度校正参量量化后的最小值, 表示为 $\text{coef}'_{(b,\min)} = \text{MIN}(\text{coef}'_{(0,b)}, \dots, \text{coef}'_{(i,b)}, \dots, \text{coef}'_{(n,b)})$; 然后将每个像素点的红基色校正参量减掉 $\text{coef}'_{(r,\min)}$ 值,

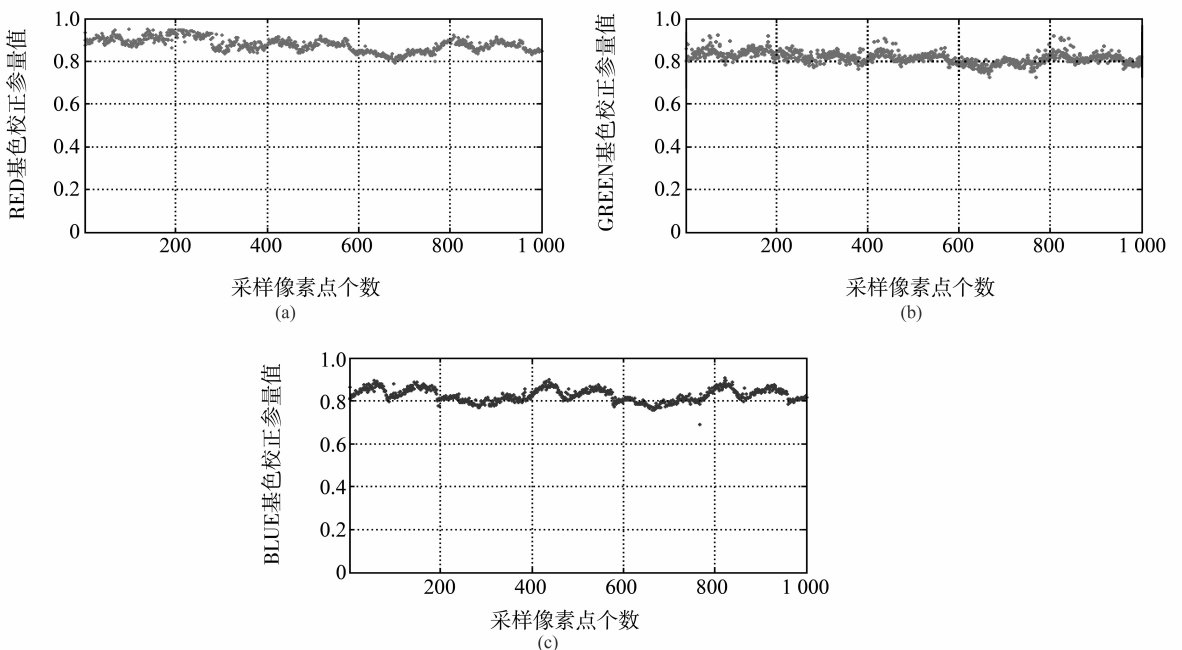


图 3 1 000 个像素点的校正参量值的分布图

Fig. 3 The distribution of the correction parameters values for 1 000 pixels

得到红基色校正参量变换值 $\Delta_{(i,r)} = \text{coef}'_{(i,r)} - \text{coef}'_{(r,\min)}$, 绿基色校正参量减掉 $\text{coef}'_{(g,\min)}$, 得到绿基色校正参量变换值 $\Delta_{(i,g)} = \text{coef}'_{(i,g)} - \text{coef}'_{(g,\min)}$, 蓝基色校正参量减掉 $\text{coef}'_{(b,\min)}$ 值, 得到蓝基色校正参量变换值 $\Delta_{(i,b)} = \text{coef}'_{(i,b)} - \text{coef}'_{(b,\min)}$ 。由此获得 $\Delta_{(i,r)}$, $\Delta_{(i,g)}$, $\Delta_{(i,b)}$ 的离散值, 分别与 $\text{coef}'_{(i,r)}$, $\text{coef}'_{(i,g)}$, $\text{coef}'_{(i,b)}$ 相比较前者数值的有效位数要少于后者数值表示的位数, 通过统计和计算每种基色的校正参量的有效 BIT 数可以减少 2 BIT。例如, 对 $\text{coef}'_{(i,r)}$, $\text{coef}'_{(i,g)}$, $\text{coef}'_{(i,b)}$ 的值进行量化和编码后表示的有效位数为 10 BIT, 则 $\Delta_{(i,r)}$, $\Delta_{(i,g)}$, $\Delta_{(i,b)}$ 的有效位数不超过 8 BIT。

在设计中, 校正参量的压缩算法实现如图 4 所示。首先需要获得全屏红基色、蓝基色、绿基色对应的校正参量的最小值 $\text{coef}'_{(r,\min)}$ 、 $\text{coef}'_{(g,\min)}$ 、 $\text{coef}'_{(b,\min)}$, 并存储到存储介质 FLASH 中, 当前置处理器上电稳定后, 需要将这 3 个参量从 FLASH 中读出且存储到锁存器中; 然后将各个像素点的校正参量 $\text{coef}'_{(i,r)}$, $\text{coef}'_{(i,g)}$, $\text{coef}'_{(i,b)}$ 分别经过加和处理进行有效位数的压缩, 压缩后的校正参量值表示为 $\Delta_{(i,r)}$ 、 $\Delta_{(i,g)}$ 、 $\Delta_{(i,b)}$ 。

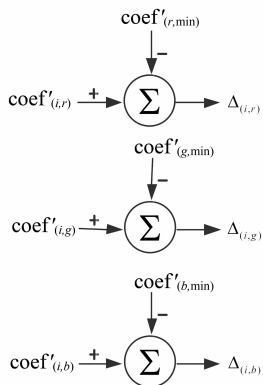


图 4 校正参量压缩方法

Fig. 4 Correction parameter compression method

压缩后的校正参量值 $\Delta_{(i,r)}$ 、 $\Delta_{(i,g)}$ 、 $\Delta_{(i,b)}$ 需要进行数据重组, 重组的变换过程如图 5 所示。

首先获得 4 个像素点的压缩校正参量 (每一个像素点的压缩校正参量的有效位数选取 24 BIT, 每个像素点包含的红、绿、蓝分别对应的压缩校正参量为 8 BIT、8 BIT、8 BIT), 然后将 4 个像素点的同基色的压缩校正参量整合成一个并行的 32 BIT 有效数据, 即由 4 个像素点对应的压缩校正参量 $P(i)$ 、 $P(i+1)$ 、 $P(i+2)$ 、 $P(i+3)$, 重组成为 3 个 32 BIT 的 3 个并行数据 $\text{OUT}(i)$ 、 $\text{OUT}(i+1)$ 、

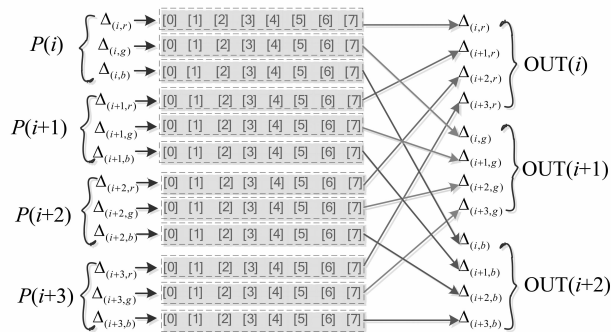


图 5 压缩校正参量的数据重组方法

Fig. 5 Data recombination method for compression correction parameter

$\text{OUT}(i+2)$ 的输出, 3 个输出量通过 FIFO 缓存器写入到 SDR SDRAM 中。

采用图 5 重组方法后, 从 SDR SDRAM 中每读出 $S = 3$ 个 32 BIT 的有效数据, 实际对应的是 $E = 4$ 个像素点的压缩校正参量值, 所以, 经采用图 3 方法压缩校正参量、图 4 数据重组变换后, 可得到等效的 SDR SDRAM 的读写有效频率为:

$$f_{\text{等效}} = f_e \times \frac{E}{S}$$

在工程设计中, 选择 $124 \text{ MHz} \leq f_e \leq 150 \text{ MHz}$, $f_{\text{等效}}$ 大于等于 165 MHz, 可以做到与 DVI 通道的传输数据的频率同步, 即可以解决不兼容计算机设置的刷新率为 $1\,920 \times 1\,080 \times 60 \text{ Hz}$ 或者 $1\,600 \times 1\,200 \times 60 \text{ Hz}$ 的情况, 提高前置处理器的兼容性和通用性。

4 实验验证

将第 3 部分分析的压缩重组算法应用到前置处理方案后经验证, 当计算机的分辨率设置为 $1\,920 \times 1\,080 \times 60 \text{ Hz}$ 、 $1\,600 \times 1\,200 \times 60 \text{ Hz}$ 或者小于两者时都可以使图像正常传输到 LED 显示控制系统, 并且能够正常显示视频和图片。

为了区分本设计中的前置处理方法, 称将逐点校正算法应用于 LED 显示控制系统中的方法为后置处理方法。通过实验验证得出: ① 前置处理方法可以无缝的应用到由各种类型控制系统控制的 LED 显示屏上; ② 通过人眼观测, 前置处理方法的校正效果, 尤其是在低灰度级上的一致化效果要差于后置处理方法的校正效果。主要是由两种方法处理后扫描到显示屏上的图像数据精度不同而引起的, 精度误差主要来源于算法应用过程。

前置处理算法如 (8) 式所描述, 校正参量 $\text{coef}'_{(i,r)}$ (以红基色的第 i 个像素点为例) 应用于数字电路中, 首先需要对该参量进行量化, 即可得到

第 i 个像素点红基色校正参量的量化值为：

$$\text{Co}_{(i,r,a)} = \text{ROUND}\left(\left(\text{coef}_{(i,r)}^{1/\gamma} \times 2^N\right)\right)$$

其中 N 为校正参量的量化精度， a 为前置算法标志， $\text{ROUND}(\)$ 函数为四舍五入取整函数。然后对相应的图像数据进行修正，将修正之后的图像数据取整后通过 DVI 传输到 LED 显示控制系统中，最后经过伽马变换扫描到显示屏上。针对该过程可以得到前置法图像数据精度偏差值为：

$$\Delta_{(i,r,a)} = k \times \left(\frac{\text{Co}_{(i,r,a)}}{2^N} \times R_s \right)^\gamma - k \times \left(\text{ROUND}\left(\frac{\text{Co}_{(i,r,a)}}{2^N} \times R_s \right) \right)^\gamma \quad (9)$$

根据 (3) 式所描述的后置处理算法，第 i 个红基色图像数据修正校正参量为 $\text{coef}_{(i,r)}$ ，首先对该参量进行量化，即得到量化值为 $\text{Co}_{(i,r,b)} = \text{ROUND}(\text{coef}_{(i,r)} \times 2^N)$ ，其中 N 为校正参量的量化精度，与前置法中的量化精度相同， b 为后置法标志。由此得到后置处理算法中图像数据精度偏差值为：

$$\Delta_{(i,r,b)} = k \times \left(\frac{\text{Co}_{(i,r,b)}}{2^N} \times R_s^\gamma - \text{ROUND}\left(\frac{\text{Co}_{(i,r,b)}}{2^N} \times R_s^\gamma \right) \right) \quad (10)$$

由 (10) 式可得到 $\Delta_{(i,r,b)}/k$ 的区间值为 $[0, 0.5)$ 。

同样， $\frac{\text{Co}_{(i,r,a)}}{2^N} \times R_s$ 值与 $\text{ROUND}\left(\frac{\text{Co}_{(i,r,a)}}{2^N} \times R_s\right)$ 值之差的区间为 $[0 - 0.5)$ ，对 (9) 式进行变换可得到 (11) 式，其中 (11) 式中的

$$\Delta = \frac{\text{Co}_{(i,r,a)}}{2^N} \times R_s - \text{ROUND}\left(\frac{\text{Co}_{(i,r,a)}}{2^N} \times R_s\right),$$

$$\Delta_{(i,r,a)} = k \times \left(\frac{\text{Co}_{(i,r,a)}}{2^N} \times R_s \right)^\gamma - k \times \left(\frac{\text{Co}_{(i,r,a)}}{2^N} \times R_s - \Delta \right)^\gamma \quad (11)$$

将 (11) 等式的左右两边都同时除 Δ ，进一步整理得到 (12) 式。

$$\frac{\Delta_{(i,r,a)}}{k \times \Delta} = \left(\left(\frac{\text{Co}_{(i,r,a)}}{2^N} \times R_s \right)^\gamma \right)' \quad (12)$$

由 (12) 式最终得到 (13) 式。

$$\frac{\Delta_{(i,r,a)}}{k} = \Delta \times \frac{2^N}{\text{Co}_{(i,r,a)}} \times \gamma \times \left(\frac{\text{Co}_{(i,r,a)}}{2^N} \times R_s \right)^{\gamma-1} \quad (13)$$

在 (13) 式中， R_s 的区间为 $[0 - 255]$ ， $\frac{\text{Co}_{(i,r,a)}}{2^N}$ 为

大于 0.5 的值，由此可分析得出前置法中扫描到 LED 显示屏上的修正图像数据的误差量 $\Delta_{(i,r,a)}$ 大于 $\Delta_{(i,r,b)}$ ，并且随着显示灰度的增大，两者的误差量值之差也越大。图像数据的误差量值与亮度偏差成正比，但是，各个灰度级上均匀性衡量是由亮度偏差率来决定的，亮度偏差率的计算方法详见文献 [14]，设定前置法和后置法的亮度偏差率分别为 $\eta_{(i,r,a)}$ 和 $\eta_{(i,r,b)}$ 。结合 (10) 和 (13) 式可得到：

$$\eta_{(i,r,b)} = \Delta_{(i,r,b)} / \left(k \times \frac{\text{Co}_{(i,r,b)}}{2^N} \times R_s^\gamma \right),$$

$$\eta_{(i,r,a)} = \Delta_{(i,r,a)} / \left(k \times \left(\frac{\text{Co}_{(i,r,a)}}{2^N} \times R_s \right)^\gamma \right) \quad (14)$$

整理 (14) 式，得到：

$$\eta_{(i,r,b)} = \Delta / \left(\frac{\text{Co}_{(i,r,b)}}{2^N} \times R_s^\gamma \right),$$

$$\eta_{(i,r,a)} = \gamma \times \Delta / \left(\left(\frac{\text{Co}_{(i,r,a)}}{2^N} \right)^2 \times R_s \right) \quad (15)$$

其中 (15) 式的 Δ 同上，表示区间值 $[0, 0.5)$ 。由 (15) 式可得出 $\eta_{(i,r,a)}$ 和 $\eta_{(i,r,b)}$ 的值随着显示灰度值 R_s 值的不断增大而变小，即高灰度的亮度偏差率会小于低灰度下的亮度偏差率。对比 $\eta_{(i,r,a)}$ 和 $\eta_{(i,r,b)}$ 的表示式可得出，在灰度值 R_s 相同的前提下， $\eta_{(i,r,a)}$ 值都大于 $\eta_{(i,r,b)}$ 值，假设 Δ 取值相同， $\eta_{(i,r,a)}$ 最小是 $\eta_{(i,r,b)}$ 的 2.35 倍。所以可以得出，前置法的低灰度的不一致性的级数要大于后置法的不一致性级数。

选取点像素进行定量计算，获得采用前置法后的亮度偏差量以及亮度偏差率的离散曲线，以及采用后置法后的亮度偏差量和亮度偏差率离散曲线，如图 6 所示。

图 6(a) 表示采用后置法后亮度偏差量随显示灰度变化的趋势，图 6(b) 表示采用前置法后亮度偏差量随显示灰度变化的趋势。很显然，在同一显示灰度下，前置法比后置法的偏差量值要大，主要根源在于前置法产生的扫描到显示屏上的图像数据的误差量比后置法要大，并且随着显示灰度值的增大两种方法的偏差量值的差值都在增大。但是，表现在显示屏的校正效果却与偏差量差值的变化趋势相反，这主要是因为衡量视觉效果参量为亮度偏差率而不是亮度偏差量。如图 6(c) 和图 6(d)，分别表示后置法和前置法的亮度偏差率随显示灰度值变化的趋势。很显然，两种方法的变化趋势相同，都为亮度偏差率的值随显示灰度值的增大而震荡减

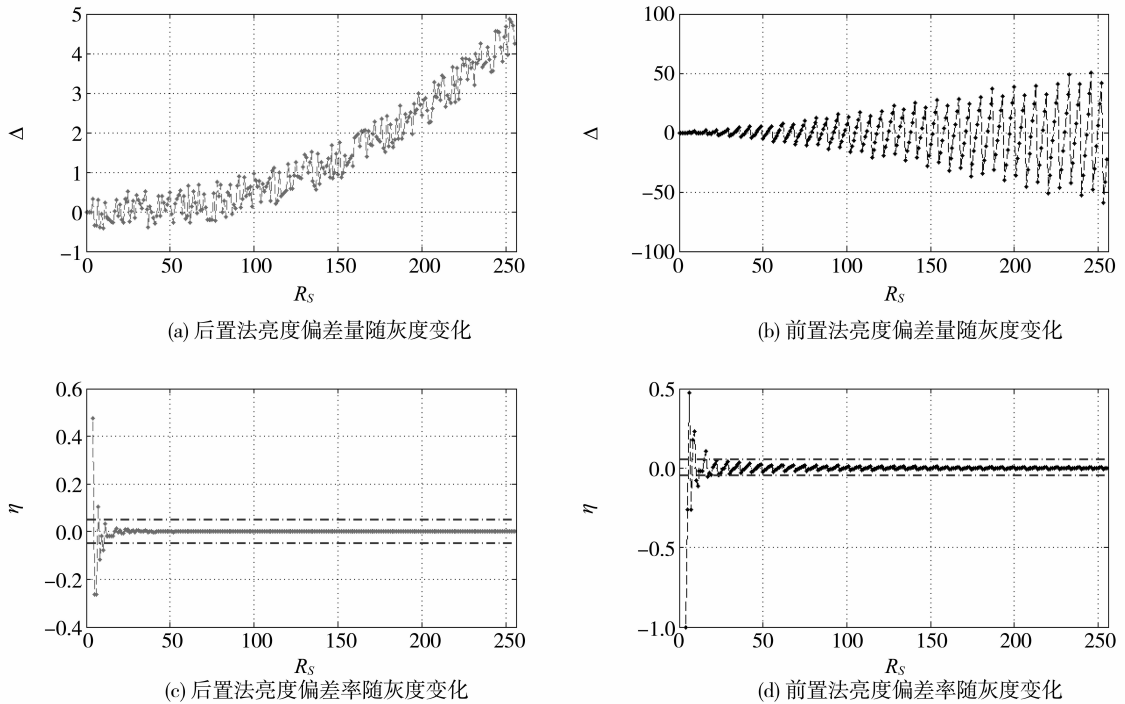


图 6 后置法和前置法的偏差值和偏差率对比

Fig. 6 Comparison of the deviation and the deviation rate between the post method and the lead method

小, 所以, 无论采用前置法还是后置法, 全彩色 LED 显示屏上的校正效果都出现中高灰度校正效果满意, 而低灰度校正效果不理想的现象, 与前述对亮度偏差率与灰度的理论分析结果一致。

图 6(c) 和图 6(d) 中都有上下两虚线, 两条虚线表示偏差率为 $\pm 5\%$ 分界线 (可作为视觉观测显示屏均匀性与否的分割点)。如果以分界线为衡量标准, 前置法中超出衡量标准灰度级数要多于后置法中的超出衡量标准的灰度级数, 所以, 两种方法修正后的显示屏的校正效果会存在差异。前置法中低灰度级不能满足一致化要求的灰度级数要多于后置法, 但是中高灰度级上校正效果无明显差别。

5 结论

本文设计并实现了一种前置亮度逐点校正算法模块, 其可兼容现有 LED 显示控制系统中所有不同分辨率和不同通讯方式的数据源。模块前置的设计方法使得这种新颖的校正算法能够脱离现有 LED 显示控制系统而独立存在, 这就大大提高了亮度校正实施的灵活性。根据实测数据, 相比于采用后置内嵌校正算法的现有 LED 显示屏, 在采用前置校正算法后, 中高灰度等级上校正效果二者基本无差别, 但低灰度等级的一致性效果不够理想, 不均匀的区间范围从 $[0, 8]$ 增大到 $[0, 30]$ 。

下一步将深入研究前置校正算法在低灰度等级上的缺陷以提高全彩 LED 显示屏的均匀性。

参考文献:

- [1] 靳桅, 朱云芳, 邬芝权, 等. LED 显示屏多扫描线数据组织的通用方法 [J]. 西南交通大学学报, 2013, 48 (2): 257 - 263.
JIN W, ZHU Y F, WU Z Q, et al. Universal data organization method of led display screen based on multi-scanning-beam [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48 (2): 257 - 263.
- [2] 黄家善, 张平均, 陈建顺. 基于千兆以太网的 LED 显示屏关键技术分析与实现 [J]. 福建师范大学学报, 2006, 22 (2): 42 - 45.
HUANG J S, ZHANG P J, CHEN J S. Key techniques and the implementation of a large led screen connected with the gigabit ethernet [J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition) 2006, 22 (2): 42 - 45.
- [3] 李爽, 王瑞光, 严飞. 全彩发光二极管交通诱导屏光纤传输系统 [J]. 光学精密工程, 2012, 20 (8): 1855 - 1861.
LI S, WANG R G, YAN F. Full-color LED display of traffic guidance fiber transmission system [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20 (8): 1855 - 1861.

- [4] 马晓阳. LED 显示屏 γ 校正的研究与实现[J]. 电光与控制, 2010, 17(6): 92-96.
MA X Y. Research and implementation of γ correction of LED display screen [J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(6): 92-96.
- [5] 余彬海, 布良基. 基于反 γ 校正的全彩 LED 显示屏灰度控制技术[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2000, 39(6): 174-177.
YU B H, BU L J. A gray control technology for full color LED display screens based on anti- γ correction[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2000, 39(6): 174-177.
- [6] 朱海峰, 刘开华, 刘伟. 以 FPGA 实现显示系统中反 γ 校正功能实现[J]. 电子测量技术, 2006, 29(1): 20-21.
ZHU H F, LIU K H, LIU W. Implementation of anti- γ -emendation based on FPGA in colorful LED display system [J]. Electronic Measurement Technology, 2006, 29(1): 20-21.
- [7] 严飞, 王瑞光, 邓意成, 等. 发光二极管显示屏分段灰度调制与优选扫描时钟获取[J]. 光学精密工程, 2013, 21(12): 3248-3254.
YAN F, WANG R G, DENG Yicheng, et al. Segmented gray scale modulation of LED display and optimal scan clock access [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(12): 3248-3254.
- [8] 陈海燕, 谢明远. 全彩色 LED 显示屏色度均匀性优化校正[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2009, 48: 206-210.
CHEN H Y, XIE M Y. Optimum adjustment to color uniformity of led display panel[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2009, 48: 206-210.
- [9] 朴燕, 王瑞光, 丁铁夫. 基于 RGB Gamma 曲线的 LED 显示图像的色散校正技术[J]. 光电子·激光, 2008, 19(1): 125-127.
PIAO Y, WANG R G, DING T F. LED color calibration technology based on RGB gamma curves [J]. Journal of Optoelectronic · Laser, 2008, 19(1): 125-127.
- [10] 陈建乐, 陈妤珊. 多视点视频中基于乘加误差模型的亮度和色差校正[J]. 电路与系统学报, 2009, 14(1): 66-71.
CHEN J L, CHEN Y S. Luminance and chrominance correction for multi-view video using multiplicative and additive errors [J]. Journal of Circuits And Systems, 2009, 14(1): 66-71.
- [11] 郝亚茹, 邓招奇, 邓春健. LED 显示控制系统移存频率加速方法研究[J]. 液晶与显示, 2016, 31(5): 470-476.
HAO Y R, DENG Z Q, DENG Chunjian. Increasing shift frequency of LED display control system [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2016, 31(5): 470-476.
- [12] 郝亚茹, 王瑞光, 陈宇, 等. 基于高效动态内存的 LED 显示系统设计[J]. 液晶与显示, 2008, 23(5): 582-588.
HAO Y R, WANG R G, CHEN Y, et al. Design of LED display system based on SDRAM memory [J]. Chinese Journal of Crystals and Displays, 2008, 23(5): 582-588.
- [13] 郝亚茹, 邓招奇, 邓春健. 基于通道复用的校正参量在线更新功能分析与设计[J]. 液晶与显示, 2016, 31(6): 569-577.
HAO Y, DENG Z Q, DENG C J. Analysis and design of online update of correction parameters based on channel reuse [J]. Chinese Journal of Crystals and Displays, 2016, 31(6): 569-577.
- [14] 郝亚茹, 邓招奇, 邓春健. 基于亮度校正模型的多参量权衡与灰度权值算法研究[J]. 发光学报, 2016, 37(4): 503-511.
HAO Y R, DENG Z Q, DENG C J. Research on multi parameters and gray weight algorithm based on the brightness correction model [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2016, 37(4): 503-511.