

文章编号:1007-2780(2017)07-0548-05

位权重于电压参数灰度法在 LCOS 显示中的应用设计

代永平*, 李 铭, 李志刚

(南开大学 光电子薄膜器件与技术研究所 光电子薄膜器件与技术天津市重点实验室,
光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要:本文在分析时分灰度法的基础上,提出一种子帧周期相等,并且位权重于电压参数的灰度调制方法,这种方法可以大幅度降低高分辨率 LCOS 器件的像素时钟频率,并消除时分灰度调制方法中潜在的闪烁现象。文中根据 n 位图像数据的比特位数值,把每帧分割成 n 个子帧,像素的灰度将由按照二进制位权重配置的驱动电压参数调制。

关键词:灰度方法;二进制;权重;电压参数;硅基液晶

中图分类号:TN27 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20173207.0548

Design for application of LCOS display with scaling method binary weighted by voltage-parameters

DAI Yong-ping*, LI Ming, LI Zhi-gang

(*Institute of Photo-electronic Thin Film Devices and Technique ,
Key Laboratory of Photo-electronic Thin Film Devices and Technique of Tianjin ,
Key Laboratory of Photo-electronic Information Science and Technology of
Ministry of Education , Nankai University , Tianjin 300071, China*)

Abstract: Based on analyzing grayscale method of time-division, a scaling method, in which either frame is binary weighted by the voltage-parameter or the duration of sub-frames are equal, has been proposed for helping lower frequency of the pixel-clock and removing the flicker appearing with method of time-division. In this paper, each frame has been divided into n -sub-frames corresponding to the n -bit image data. The grayscale of pixel is controlled by the binary weight of the level of driving voltage.

Key words: scaling method; binary weight; electrical-parameter; LCOS

收稿日期:2017-02-09;修订日期:2017-04-13.

* 通信联系人, E-mail: daiyp@nankai.edu.cn

1 引言

LCOS 显示器件属于一种反射式 LCD 技术领域产品,这类产品的一个基板采用半导体 CMOS 工艺制备的集成电路芯片,另一个基板采用热膨胀系数接近单晶硅材料的硼硅玻璃,并且覆盖透明公共电极,在这两个基板之间通常封装向列型液晶材料,然后在液晶材料各像素区域施加不同的电场,可以引起液晶分子排列方向和位置的变化,导致反射光的光学性质变化,实现对光信号的调制。随着半导体芯片光刻技术越来越精细,CMOS 器件特征尺寸甚至进入 10 nm 级时代,LCOS 作为光学调制器件表现出在不足方寸的空间中能够实现超过 3 000 ppi 甚至 8K 分辨率的技术优势,令业界兴奋不已^[1-2]。

因此,不仅是第一代的 Google glass 使用 LCOS 器件作为成像器件,而且刚过去的 VR 元年中,微软呈现大众的 HoloLens 全息眼镜也使用了 LCOS 器件,两款视频眼镜同样是面对近眼显示应用,分辨率则从 360×480 提升到了 $1\,024 \times 1\,280$,实际应用反馈信息表明:产品体验得到良好提升。

作为显示器件,所呈现的视频图像既要求配置几个微米尺寸的像素,又要求具备丰富的明暗层次变化,所以,在显示技术领域定义了一个称为灰度(Grayscale)的术语,就是用灰度参数来表示像素的明亮程度,灰度越高,所显示图像的层次越分明,图像越柔和。在 LCOS 应用技术中,一般通过调控每个像素单元反射光的强度、或者变化反射光的周期、或者设置不同像素面积,就形成了 3 种控制像素单元亮度的方法,即:电压参数灰度调制、空分灰度调制和时分灰度调制^[3-5]。

这 3 种灰度方法在 LCOS 显示技术应用中,视具体应用环境而言各有优势,本文将在常规时分灰度调控方法的基础上,探索出一种位权重于电压参数的灰度法,大幅度降低高分辨率 LCOS 器件的像素时钟频率,甚至扩展那些响应时间处于毫秒级的向列型液晶材料在 LCOS 显示技术中的应用。

2 灰度调制方法简述

一般来说,经 γ 校正后的电压灰度调制模式是 LCOS 显示器件应用中最常见的灰度实现方法,基本原理源于 LCOS 显示器件的像素工作在一定驱动电压范围内,其调控的反射光强度与驱动电压具有单调函数关系的特性,通过控制像素单元驱动电压幅值的线性变化来均匀调节灰度^[3]。如图 1 所示,其中实线 a 是实际像素驱动电压经过非线性校正后随时间做周期性调控(如图中所示采用九点折线法进行 γ 校正,产生 256 级灰度, $T_0 \sim T_1$ 为正场期间, $T_1 \sim T_2$ 为负场期间);虚线 b 是液晶材料的电光特性曲线;段线 c 表示像素液晶材料无论在正场期间还负场期间,经过非线性校正后,实际电光特性呈现均匀变化。

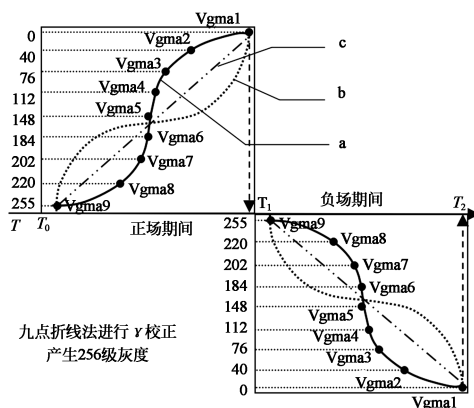


图 1 经 γ 校正后的电压灰度调制方法

Fig.1 Scaling method controlled by the levels of voltage with a γ correction

另一方面,LCOS 显示技术中的时分灰度方法不仅用在画面高品质的数字影院中,也用在光通信领域的空间调制器上。时分灰度法的基本原理是,利用人眼视觉细胞对瞬态光强呈现的积分特性,调控 LCOS 器件在视觉暂略期间开关态时长不等来显示不同的灰度,在每个帧周期内单个像素开关态时长累积占空比决定了像素灰度值的大小。

还有一种空分灰度调制方法,原理上可以将每个像素占有的调光面积空间划分为若干个可单独控制的子像素,当不同数量的子像素反光时每个像素就能展现出不同的灰度。显然,随着灰度数值的增大,需要将 LCOS 器件的子像素尺寸设

计为灰度数值的倒数倍, LCOS 器件显示区对角线通常不超过 1 in (1 in = 2.54 cm), 像素截距 20 μm 以下, 空分灰度调制方法显然对 LCOS 器件制备工艺提出了极高的要求。

3 时分灰度方法

众所周知, 当图像像素单元显示信号量化为一系列 n 位的二进制数据后, 每个二进制数据由位权重和位数值构成 (如图 2 所示, 描述了量化为 5 位二进制数据的像素驱动电压值), 假设在第 i 个帧周期内, 某个像素单元显示的比特位为 5 的二进制数据是 10110, 该数据的左边为低位, 右边为高位, 从左向右位权重变化是: $2^0 = 1, 2^1 = 2, 2^2 = 4, 2^3 = 8, 2^4 = 16$; 位数值是量化编码“1”或者“0”, 分别确定在这一子场内像素处于暗态还是亮态。

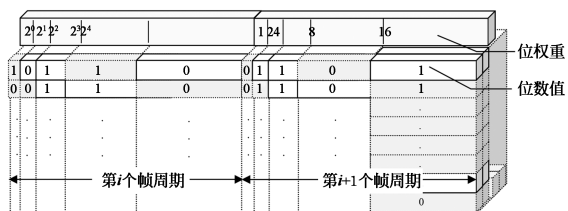


图 2 量化为 5 位二进制的图像数据

Fig.2 Image data quantized into 5-bit binary digit for displaying

在 LCOS 器件的时分灰度控制法的显示应用中, 将帧周期划分为若干个子周期, 比如像素的量化数据位数是 n ($1 \leq n$ 的整数), 则帧周期分割为 n 个子周期, 且第 i ($1 \leq i \leq n$) 位对应的子周期记为 T_{Fi} , 考虑到通常采用的向列型液晶材料存在毫秒量级的响应时间, 则:

$$T_{Fi} = T_i + T_r, \quad (1)$$

其中: T_i 是经 LCOS 像素单元输出的反射光时长, 当位数值为“1”, 表示有光反射输出, 当位数值为“0”, 则表示禁止输出反射光 (反之规定反射光的有无输出同样成立); T_r 是像素单元液晶材料的响应时间, 同时假设 $i = 1$ 时得到最短子周期, 即:

$$T_{F1} = T_1 + T_r, \quad (2)$$

显然, T_1 为 LCOS 像素单元有效输出反射光的最短时长, 令,

$$T_r = \alpha T_1, \alpha \text{ 为系数} . \quad (3)$$

当第 i 子场中的有效输出反射光的时长 T_i , 与其像素单元所显示的图像数据的位权重对应匹配时, 可以得到精度范围内任意灰度级显示效果^[6]。为了理解直观, 如图 3 所示, 将某个帧周期划分为 5 个子周期, 各子周期比例为:

$$\begin{aligned} T_{F1} : T_{F2} : T_{F3} : T_{F4} : T_{F5} &= (2^0 T_1 + T_r) : \\ &(2^1 T_1 + T_r) : (2^2 T_1 + T_r) : \\ &(2^3 T_1 + T_r) : (2^4 T_1 + T_r) \end{aligned}$$

将前面的(3)式代入上式, 则:

$$\begin{aligned} T_{F1} : T_{F2} : T_{F3} : T_{F4} : T_{F5} &= \\ (1 + \alpha) : (2 + \alpha) : (4 + \alpha) : (8 + \alpha) : (16 + \alpha) , \end{aligned}$$

也就是说, LCOS 器件显示每帧图像的子场周期中, 各有效反光时长分别等效于 $2^0 = 1, 2^1 = 2, 2^2 = 4, 2^3 = 8, 2^4 = 16$ 个发光单位 (如图 3 所示), 加上不发光占据 0 个发光单位, 共计 32 个发光单位; 对于具体的图像数据 10110 (规定左边为最低位, 右边位最高位), 其开态显示时间累计为 $1 + 0 + 4 + 8 = 13$ 个单位, 因此人眼感受到的光强度是全亮态强度的 $13 / (1 + 2 + 4 + 8 + 16) = 13 / 31$ 。

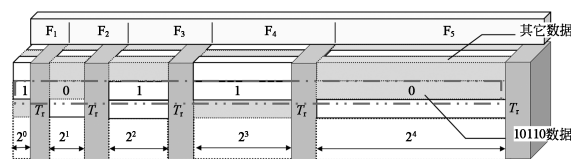


图 3 LCOS 显示器时分控制模式

Fig.3 Time-division mode controlled by sub-frame within LCOS display

同时可以归纳出这类位权重于时间参数的时分控制方法中, 有效反射光的最短时长如下所表述:

$$T_{\min} = \frac{T_F - n T_r}{2^n - 1}, \quad T_F : \text{帧周期} . \quad (4)$$

假设响应时间为 1 ms 的向列型 LCOS 显示器件, 要实现 256 灰度级显示的目标, 即: $n = 8, T_r = 1 \text{ ms}$, 即代入(4)式, 有:

$$T_{\min} = \frac{T_F - 8 T_r}{28 - 1} = \frac{T_F - 8}{255} (\text{ms}) . \quad (5)$$

在我国广泛使用的电视播放制式 Pal 制, $T_F = 20 \text{ ms}$, 代入(5)式, 则:

$$T_{\min} \approx 47.1 \mu\text{s}$$

不妨估算一下分辨率为 XGA (768×1024 的像素矩阵) 的一帧显示图像的像素数据时钟周

期 P_{clk} , 即:

$$P_{\text{clk}} = \frac{T_{\text{min}}}{768 \times 1\,024} \approx 0.06 \mu\text{s},$$

相当于像素时钟频率为 16 GHz, 即使每个像素周期内读取 16 个像素的图像数据(需要 $16 \times 8 = 128$ 条数据线), 像素时钟频率也高达 1 GHz, 对于普通电子线路制造来说这是一个不可能实现的生产目标。

显然, 随着 2K、4K 等高分辨率显示器件的问世, 以及 8 位、10 位、12 位等超高级灰度图像的要求, 当前应用的上述时间控制法将因为时间分割得过细而陷入无法提供足够的数据带宽来输入视频数据^[1,2,7]。

4 时分方法中的闪烁现象分析

如果将 LCOS 器件像素封装的液晶材料更换为小分子铁电液晶等具备快速响应特性的液晶材料, 响应时间减小到微秒量级^[9], 虽然能有助于时分灰度方法降低像素时钟频率, 但仍然存在影响显示效果的缺陷^[10]。

前面提到, 人眼视觉细胞对光刺激的响应是呈指数变化的, 类似脉冲电路中 RC 器件对电压传输的响应过程^[11]。令 L 为刺激光线的光强, L_e 为人眼感觉的光强, 光线从暗态改为亮态时, 人眼感觉到的光强如下:

$$L_e = L_0 + L_1 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \tau \text{ 为时间常数}, (6)$$

这里, L_0 为亮态刺激开始前的人眼亮度感觉, L_1 为亮态刺激光强, t 为有效光刺激时间; 相反, 光线从亮态改为暗态时, 人眼感觉到的光强如下:

$$L_e = L_0 (e^{-\frac{t}{\tau}}), \tau \text{ 为时间常数}, (7)$$

这里, L_0 为亮态消失前的人眼亮度感觉。

时分灰度调控方法规定了高位所占的时间较长, 可以理解为单位时间内亮态与暗态之间转换次数少, 相反, 低位所占时间比较短, 那么单位时间内亮态与暗态之间转换次数较多, 在实际应用中, 当观看者眼球运动时, 会带来视觉闪烁、人为色分离、中间色调失真、动态图像不稳定等影响显示效果的缺陷^[4]。

所以, 要改善时分灰度调制下的 LCOS 器件图像的显示效果, 就需要改进灰度算法, 设计出像素亮暗转换速率与时间均匀分布的显示

方法。

5 电学位权重灰度合成方法

上述讨论表明, 那些选择时分灰度控制法的 LCOS 器件遵循的工作原理是: 不仅在子周期内有效反射光的时长与像素图像数据的位权重对应匹配^[11], 而且保持在每个子周期内亮态像素驱动电压参数不变。那么, 如果要求保持每个子周期相同, 同时调控像素驱动电压值这个电学参数与像素图像数据的位权重对应匹配, 情形如何呢?

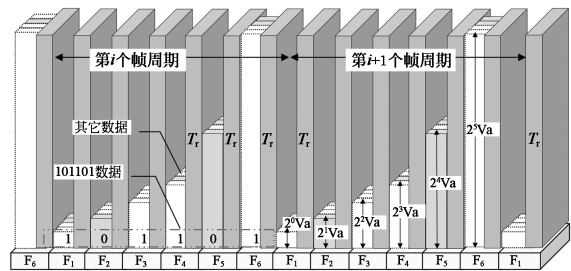


图 4 权重式电压参数分割控制模式

Fig. 4 Voltage-parameter-division mode controlled by binary weight

具体地说, 根据位权重分割的不是周期这类时间参数, 而是 LCOS 像素单元作用在液晶驱动电极上的电压值。我们首先仍然按照所显示数据的比特位数把每个帧周期分为 n 个子场, 但每个子周期保持相同, 即 $T_{\text{SF}} = T_F / n$, 同时把每子周期对应的驱动电压数值与数据比特位的权值一一匹配, 如图 4 所示 6 位图像数据的权重式电压参数分割控制方法, 其中第 i 帧均匀划分成 6 个子帧, 配置第 1 子帧 LCOS 像素的驱动电压值为 V_a , 则从左到右相应的像素驱动电压值匹配位权重后, 分别是: $2^0V_a, 2^1V_a, 2^2V_a, 2^3V_a, 2^4V_a, 2^5V_a$ 。

我们仍然以 XGA 分辨率的显示情形为例, 这时候各子周期均相等, 为:

$$T_1 = T_2 = T_{\text{Fi}} = \frac{T_F}{n} T_r, T_F: \text{帧周期}. (8)$$

令 $n = 8, T_r = 1 \text{ ms}, 50 \text{ Hz}$ 的帧频对应 20 ms 的帧周期, 代入(8)式, 则: $T_{\text{Fi}} = 1\,500 \mu\text{s}$, 即像素时钟为:

$$P_{\text{clk}} = \frac{T_{\text{Fi}}}{768 \times 1\,024} = \frac{1\,500 \mu\text{s}}{768 \times 1\,024} \approx 1.9 \text{ ns}$$

相当于像素时钟为 526 MHz 左右, 如果配置每个

时钟周期内读取 8 个 8 位像素图像数据的功能电路(仅需要 $8 \times 8 = 64$ 条数据线),那么像素时钟频率则是:66 MHz,这是常规电子线路生产线能够完成的任务。

另外,电学参数最大值与最小值的比值:

$$\frac{B_{\max}}{B_{\min}} = \frac{2^7 V_a}{2^0 V_a} = 2^7 = 128$$

尽管相差两个数量级,但对于实际应用中常见的 LCOS 像素驱动电压为 5 V 的情形,低权位值相邻的相应电压开态参数差异约 40 mV,这对于 CMOS 芯片器件是可以实现的。

6 结 论

本文提出的一种基于二进制位权的像素驱动电压值分割灰度合成方法,合理地解决了由于电压(电流)值分割过多而无法分辨差异、导通时间分割过细而无法读取视频数据的局限性。当然,在电压权位灰度实现分析中,如果采用高品质、高成本的生产技术,那么通过简单的逆运算就会发现,本文讨论的灰度方法可以直接实现 4K 显示分辨率的 256 级灰度显示。

参 考 文 献:

- [1] KANAZAWA M, KUSAKABEY. Ultrahigh-definition LCOS projectors [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2013, 101(1): 89-98.
- [2] LEE J H, KIM E, LEE S, et al. A high definition LCoS Backplane with HV CMOS Switches and dual storages pixel array [C]//*Proceedings of 2015 International SoC Design Conference (ISOCC)*. Gyungju: IEEE, 2015: 179-180.
- [3] REHMAN U, CAO S. Augmented-reality-based indoor navigation: a comparative analysis of handheld devices versus google glass [J]. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2017, 47(1): 140-151.
- [4] MOSER K R, SWAN J E. Evaluation of user-centric optical see-through head-mounted display calibration using a leap motion controller [C]//*Proceedings of 2016 IEEE Symposium on 3D User Interfaces*. Greenville, SC: IEEE, 2016: 157-167.
- [5] 李鹏飞, 许金凯, 胡立发, 等. 人眼像差校正仪成像 CCD 随动控制的设计与实现 [J]. 液晶与显示, 2010, 25(5): 732-737.
- LI P F, XU J K, HU L F, et al. Design and realization of focus auto adjustment for imaging CCD in retinal aberration correction setup [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2010, 25(5): 732-737. (in Chinese)
- [6] 卓力, 王素玉, 李晓光. 图像/视频的超分辨率复原 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011: 185.
- ZHUO L, WANG S Y, LI X G. *Image/Video Super Resolution* [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2011: 185. (in Chinese)
- [7] KANG J S, KWON O K. Digital driving method for low frame frequency and 256 gray scales in liquid crystal on silicon panels [J]. *Journal of Display Technology*, 2012, 8(12): 723-729.
- [8] PARK S J, KIM S M, WON C S. Design considerations for pico-projector based on LCoS and 3-LEDs [C]//*Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*. Las Vegas, NV: IEEE, 2011: 805-806.
- [9] 贾建援, 陈恭华. 数字微反射镜的机械光学特征研究 [J]. 电子机械工程, 2000(4): 3-7.
- JIA J Y, CHEN G H. Study on the mechano-optical properties of digital micromirror devices [J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2000(4): 3-7. (in Chinese)
- [10] 郑远洋, 唐岳, 侯君, 等. 铁电液晶的分子结构与性能评述: (I) 分子核对铁电液晶性能的影响 [J]. 液晶与显示, 2005, 20(6): 516-525.
- ZHENG Y Y, TANG Y, HOU J, et al. Review on structure and properties of ferroelectric liquid crystals: (I) effect of molecular core on the properties of ferroelectric liquid crystals [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2005, 20(6): 516-525. (in Chinese)
- [11] VAN KESSEL P F, HORNBECK L J, MEIER R E, et al. A mems-based projection display [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1998, 86(8): 1687-1704.

作者简介: 代永平(1968-), 男, 云南人, 教授, 主要从事 LCoS、TFT-LCD、硅基 OLED 显示技术应用研究。E-mail: daiyp@nankai.edu.cn