

文章编号:1007-2780(2019)11-1079-12

基于通用三原色信道的四原色图像颜色表示方法

宇 欣¹, 雷志春^{1,2*}

(1. 天津大学 微电子学院, 天津 300072;

2. 鲁尔西应用科学大学 传感与测量研究所, 德国 45479)

摘要: 本文针对当前多原色宽色域成像系统的图像信号无法在现有标准三原色信道传输、以及多原色宽色域显示系统没有多原色图像源的问题, 提出了一种基于通用三原色信道的四原色图像颜色表示方法。由四原色构成的四边形被分解为两个三角形, 位于每个三角形内的复合色光可以由三原色进行唯一地表达。若四原色成像系统摄取的彩色像素位于由红绿蓝三原色构成的三角形内, 该像素将按照标准 YUV 格式进行编码, 形成 YUV 序列; 若四原色成像系统摄取的彩色像素不位于由红绿蓝三原色构成的三角形内, 该像素将采用非标准 YUV 格式进行编码, 也形成 YUV 序列。标准 YUV 格式与非标准 YUV 格式的区别使得解码器能够盲识别彩色像素来自红绿蓝三原色还是来自其他三原色, 从而使宽色域视频显示系统使用相应的三原色进行正确显示。实验结果表明: 本文提出的图像编码方法可以完全利用标准三原色信道传输四原色图像信号, 解码器可以 100% 正确识别 YUV 信号的原色来源。作者利用 JPEG 图像压缩算法测试 YUV 序列, 相较于 RGB 三原色系统下的标准 YUV 序列, 非红绿蓝三原色下的 YUV 序列压缩率提升 0.07~5.99, 色域覆盖率远远超过 Pointer 色域, 更加接近人眼可视色域。

关键词: 宽色域; 四原色; YUV; 颜色变换; 编解码

中图分类号: TN919.81 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/JYXS20193411.1079

Representing four-primary-color image based on three-primary-color channels

YU Xin¹, LEI Zhi-chun^{1,2*}

(1. School of Microelectronic, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Institute of Sensing and Measurement, University of Applied Sciences Ruhr West, 45479, Germany)

Abstract: To overcome the problem that images captured by the current imaging system with the multi-primary-color image sensor cannot be transmitted under the three-primary-color channel, as well as the wide color gamut display system using multi-primary color filters or backlight does not have multi-primary-color image contents, this paper presents a method transmitting four-primary-color images only with the data amount of the YUV format. The quadrilateral constituted by four-pri-

收稿日期: 2019-08-14; 修订日期: 2019-09-03.

基金项目: 广东省“杨帆计划”引进创新创业团队项目 (No. 2016YT04G420)

Supported by Guangdong YangFan Innovative & Entrepreneurial Research Team Program (No. 2016YT04G420)

* 通信联系人, E-mail: zclei@tju.edu.cn

mary colors is decomposed into two triangles so that one can represent a composite color uniquely using the corresponding three-primary colors. If a composite color lies in the RGB triangle, it can be encoded according to the standard YUV format. Otherwise, it can be encoded in a non-standard YUV format. The difference between standard YUV format and non-standard YUV format enables the decoder to blindly identify the source of the YUV data stream. In this way, the display can render the color in question using three corresponding primaries. The experimental results show that the proposed image coding method can completely deliver the four-primary-color image signals using the YUV data amount. Decoder can identify the source of the YUV data stream absolutely. Using JPEG compression algorithm to test the YUV sequence, the compression ratio is increased by 0.07~0.59 compared to the RGB three-primary-color system. The gamut coverage far exceeds the Pointer gamut, even is closer to the visible gamut of the human eye.

Key words: wide color gamut; four-primary-color; YUV; color transform; codec

1 引言

采用 BT.709 标准^[1]的三原色(即红色(R), 绿色(G)和蓝色(B), RGB)彩色图像仅能覆盖视觉轨迹的 33.24%, 在显示端, 可以呈现的最大色域覆盖范围甚至更小。许多颜色, 特别是具有高饱和度的颜色, 不能通过混合 R、G 和 B 形成。

视频广播, 通信, 电子商务等领域对高色彩保真度的要求^[2-3]促使了宽色域(WCG)技术的出现。近些年来, 为了扩展色域, 国内外开展了大量研究工作, 主要有以下 4 个方面: (1) 采用“负”值 RGB 色光, 例如 IEC 61966-2-4^[4] 标准通过传输“负”值 RGB 原色并放宽预留量化层来扩展色域。但是, IEC 61966-2-4 需要压缩“负”值颜色信号, 压缩会影响信号的保真度, 从而会导致颜色重现的误差, 特别是对于“负”值红色, 因为其绝对幅度比绿色和蓝色的绝对幅度大得多。此外, 借助附加量化级别的色域扩展有限, 色域覆盖率仅能扩展至 37.15%^[5], 即相对于 BT.709 定义的传统色域, 采用 IEC 61966-2-4 后的色域覆盖率只能提高约 5%; (2) 采用高饱和度的三原色, 例如 BT.2020 标准^[6] 规定了迄今为止三原色可以实现的最大色域, 覆盖 99.9% 的 Pointer 色域^[7]。由于其对高饱和度颜色的要求很高, 尽管 HDR10、Dolby Vision、HDMI2.0、DisplayPort1.4、H.265/HEVC 等标准支持 BT.2020, 但是到目前为止还没有能够完全满足 BT.2020 要求的成像技术和显示技术。而且 BT.2020 的色域仍然限制在 RGB 三角形区域, 无法覆盖人眼全部可视色域。值得一提

的是, 工业界已经指出了覆盖 Pointer 色域之外的颜色的必要性, 例如霓虹灯、LED 灯和激光等人造光源的颜色超出了 Pointer 色域^[8], 甚至也超出了 BT.2020 色域^[9-10]。另外, 通过将量子点技术应用到成像设备^[11,12], 可以对纯色进行成像, 这些色彩位于 Pointer 色域之外。因此, 尽管当前与 WCG 相关的标准通常将 Pointer 色域视为目标色域, 但是其不应该是技术发展的最终色域; (3) 采用多原色显示器, 例如采用多原色滤光片和多原色背光源扩展液晶显示系统的色域范围^[13-23]。然而, 扩展源端的色域是扩展显示端色域的基础, 仅当成像源提供多原色的信息时, 才能实现在显示端扩展色域; (4) 采用多原色图像传感器: 例如 CYGM(青色, 黄色, 绿色, 品红色)图像传感器^[24]以及 RGBE(红色, 绿色, 蓝色和宝石蓝色)图像传感器^[25]。特别是 RGBE 图像传感器, 其滤光阵列中的 E 原色作为红色的补色, 更接近人类视觉系统的特性。

多原色技术可以更有效地覆盖 Pointer 色域和人眼可视色域, 不仅涉及到已有的成像和显示方面的研究, 而且还涉及到本文研究的多原色高效传输问题。目前 WCG 的视频编码标准, 例如 JPEG XT 和 HEVC^[26-27], 还不能够通过 YUV 格式的数据量解决兼容传输四原色信号的问题, 不仅限制了多原色图像传感器的广泛应用, 也限制了多原色显示器的色域扩展范围。为有效传输四原色图像信号, 为四原色图像传感器的应用铺平道路, 并且使四原色显示器能够接收和正确显示四原色图像信号内容, 以达到扩展色域的目的, 本文提出一种利用三原色图像的传输带宽, 即

YUV 信号的传输带宽,传输四原色图像信号的方案。

2 传输四原色视频面临的问题

虽然 RGBE 等四原色图像传感器已被相机开发和使用,但其缺乏用于传输附加 E 原色的传输方法,仍然不能传输四原色视频图像源到四原色视频显示端。以下,作者将讨论两种传输四原色的方法,两种方法都存在数据量显著增加的问题。由于本文论述的四原色颜色表示方法不限制第四原色,因此后文将用 ' X ' 表示第四原色。

2.1 传输四原色的直接方案

图 1 示出直接传输四原色图像视频的方案。目前通用的 R 、 G 、 B 三原色仍然形成标准的 YUV 3 个信号,而 X 原色信号作为独立信号传输。普通显示器只处理 YUV 信号,丢弃 X 图像分量。多原色显示器则能处理 YUV 和 X 四个图像信号,达到扩展色域的目的。但是上述直接传输四原色图像的方法将显著增加传输数据量。

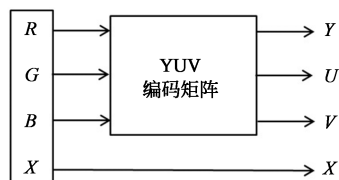


图 1 传输 RGBX 视频的直接方案

Fig. 1 Straight forward scheme for distributing RGBX color image

2.2 将四边形分解为两个三角形

RGB 三原色和第四原色 X 构成四边形,将四边形分解为两个三角形、并且针对一个像素仅传输三原色,与上述直接方案相比,可以显著减少数据量。其中 X 原色位于直线 BG 的左侧,如图 2 所示。

对于当前的三原色视频系统,由 RGB 三角形覆盖的复合色光只存在唯一的表达方式。而在四原色的情况下,复合色光的表达方式不唯一,如图 2 的复合色光 C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 所示。这些复合色光可以由 R 、 G 、 B 和 X 混合,但是, R 、 G 、 B 和 X 的混合比例不是唯一的,而且如前所述,由四原色表示的色光将对视频传输构成高

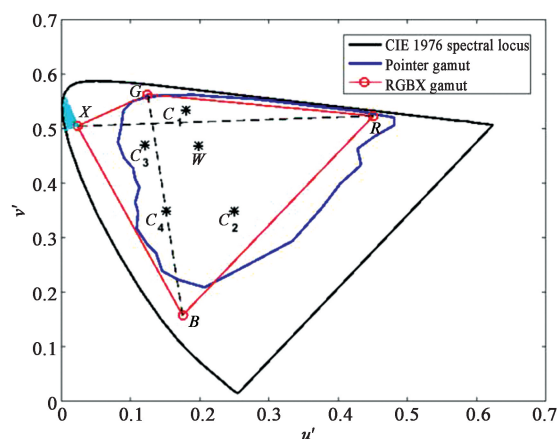


图 2 由 RGBX 四原色构成的色域 (RGB 为 BT.709 三原色)

Fig.2 Gamut constituted by R , G , B , X (RGB are primaries specified by BT.709)

数据量的挑战。

为了解决上述问题,本文将由 R 、 G 、 B 和 X 构成的四边形分解为两个三角形 RGB 和 XGB,如图 2 所示。图 2 中如 C_1 的色光位于 RGB 三角形内部,可以由 R 、 G 和 B 三原色计算。这些色光在传统显示器的色域内,可以通过传统的显示设备正确地呈现。因此,传输色光如 C_1 的 YUV 信号将由 R 、 G 和 B 计算。虽然类似 C_1 的色光也在三角形 RGX 内,并且可以由 R 、 G 和 X 计算,但它的传输与当前 RGB 视频系统不兼容。出于同样的原因,图 2 中的色光 C_2 (位于 RGB 三角形和 RXB 三角形内)亦应由 R 、 G 和 B 表示。相反,类似 C_3 的色光不在三角形 RGB 内,不能用 RGB 三种原色混合,普通显示设备不能正确地呈现类似 C_3 的色光。但是,色光 C_3 位于 XGB 三角形内,因此可以使用 X 、 G 和 B 三原色进行混合。为了传输例如 C_3 的复合色光,还必须像 RGB 情况一样,构建 Y 、 U 和 V 信号,但是,它们的含义与 RGB 情况的 YUV 不同。BG 线上的复合色光,例如 C_4 ,虽然既可以用 RGB,也可以用 XGB 三原色表示,但是在这种情况下, R 和 X 均为 0,只有普通三原色中的 G 和 B 有助于混合它们,所以不受 RGB 和 XGB 的限制。

选择三角形后,需要计算亮度信号 Y 和两个色差信号 U 和 V 以达到传输的目的。为了标识 YUV 的来源,需要附加标志信息,即标识由 RGBX 四边形分解的哪个三角形 (RGB 或 XGB)

计算而来。原则上,每个像素都需要附加标志信息,以标识构成 Y、U 和 V 信号的三原色,如图 3 所示。

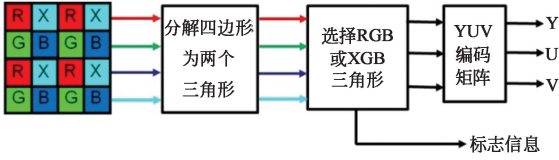


图 3 带有标志信息的四原色传输方法

Fig. 3 Method of transmitting four-primary colors with metadata

图 3 所示的传输方案比图 1 所示的直接方案需要的数据量少。因为对于任何像素,只需要 1 bit 数据来指示 YUV 数据的来源,即 XGB 或 RGB 三原色系统。然而,为每个像素额外传输 1 bit 数据的也增加了 YUV 信号总数据量,从而对频带资源带来挑战。例如,要传输一 $1\,920 \times 1\,080$ 格式的 HDTV 图像,需要额外传输 $1\,920 \times 1\,080 \times 1$ bit 标志数据。即使在 $4:2:0$ 下采样时,即 960 列和 540 行,也需要 $960 \times 540 \times 1$ bit 标志数据来传输每个像素的来源。

由于上述方案与 2.1 节的方案都存在数据量显著增加的问题,本文开发了一种盲识别方法,即

无需传输标志信息来识别 YUV 数据来源的方法。在下一节中,作者将描述 RGB 和 XGB 的不同颜色编码方案,使得解码器盲识别 YUV 的来源。

3 三原色的编码方案和盲识别方法

为了识别传输的 YUV 数据来自于 RGB 还是 XGB 颜色空间,本文将在 XGB 和 RGB 颜色空间中使用不同的 YUV 编码方案。由于需要下标区别 XGB 和 RGB 颜色空间,为了简化,本文的 Y、U 和 V 信号与 Y、Cb 和 Cr 信号意义相同。因为有 RGB 和 XGB 情况, Y_{RGB} 、 U_{RGB} 和 V_{RGB} 用于表示 RGB 情况下的 Y、U 和 V 信号。类似地, Y_{XGB} 、 U_{XGB} 和 V_{XGB} 表示 XGB 情况下的 Y、U 和 V 信号。

下面以 HDTV 为例,分别阐述 RGB 颜色空间的编码和解码以及 XGB 颜色空间亮度信号、色差信号的确定和盲识别 YUV 数据来源的方法。

3.1 RGB 颜色空间的编码和解码

RGB 颜色空间的编码和解码与通用三原色 HDTV 色度系统相同。对于 RGB 情况,根据 ITU-R BT.709, HDTV 信号的亮度信号和两个色差信号具有如下关系:

$$\begin{cases} Y_{\text{RGB}} = 0.2126 R_0 + 0.7152 G_0 + 0.0722 B_0 \\ U_{\text{RGB}} = k_B (B_0 - Y_{\text{RGB}}) = -0.1146 R_0 - 0.3854 G_0 + 0.5000 B_0, \\ V_{\text{RGB}} = k_R (R_0 - Y_{\text{RGB}}) = 0.5000 R_0 - 0.4542 G_0 - 0.0458 B_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, Y_{RGB} 代表 RGB 情况下的亮度信号; U_{RGB} 、 V_{RGB} 代表 RGB 情况下的两个色差信号; R_0 代表红原色信号; G_0 代表绿原色信号; B_0 代表蓝原色信号。红、蓝色差信号的压缩系数分别为: $k_R = 0.5/0.7874 = 0.635$, $k_B = 0.5/0.9278 = 0.539$ 。

Y_{RGB} 的标称范围是 $[0, 1]$; U_{RGB} 和 V_{RGB} 的标称范围为 $[-0.5, 0.5]$, 在进行偏置后, 它们的标称范围与 Y_{RGB} 信号的标称范围相同。

在数字电视系统中, 亮度信号和色差信号也必须通过采样和量化处理。当采用 8 位量化时, 亮度信号被均匀量化为 256 个量化级。在 256 个量化级中, 上端留 20 个量化级, 下端留 16 个量化级, 作为防止超越动态范围的保护带。量化级 0 和 255 用于同步, 亮度信号占据 220 个电平, 其中黑色电平处于量化电平 16, 白色电平处于量化电

平 235。

根据方程(1), 两个色差信号都是双极性信号, 占据 225 个量化电平, 类似于亮度情况, 上端留 15 个量化级, 下端留 16 个量化级。

因此, 当在数字视频中应用 n 比特量化时, RGB 和 YUV 系统可以由方程(2)和(3)表示:

$$\begin{cases} R' = \text{INT}[(219 R_0 + 16) \times 2^{n-8}] \\ G' = \text{INT}[(219 G_0 + 16) \times 2^{n-8}] \\ B' = \text{INT}[(219 B_0 + 16) \times 2^{n-8}] \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} Y'_{\text{RGB}} = \text{INT}[(219 Y_{\text{RGB}} + 16) \times 2^{n-8}] \\ U'_{\text{RGB}} = \text{INT}[(224 U_{\text{RGB}} + 128) \times 2^{n-8}] \\ V'_{\text{RGB}} = \text{INT}[(224 V_{\text{RGB}} + 128) \times 2^{n-8}] \end{cases} \quad (3)$$

其中: R' 、 G' 和 B' 表示量化后的 RGB 信号, Y'_{RGB}

是量化的 Y_{RGB} 信号, U'_{RGB} 和 V'_{RGB} 是量化的 U_{RGB} 和 V_{RGB} 信号, 运算符 INT 表示舍入操作。

由于 8 位量化广泛用于现有的信号系统, 本文将 8 位量化为例研究宽色域视频图像表示方法。当 $n=8$ 时, 将方程(3)转换为矩阵形式, RGB 和 YUV 颜色空间数据通过方程(4)和(5)相互转换:

$$\begin{bmatrix} Y'_{\text{RGB}} \\ U'_{\text{RGB}} \\ V'_{\text{RGB}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.212\ 6 & 0.715\ 2 & 0.072\ 2 \\ -0.117\ 2 & -0.394\ 2 & 0.511\ 4 \\ 0.511\ 4 & -0.464\ 5 & -0.046\ 9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1.539\ 7 \\ 1 & -0.183\ 2 & -0.457\ 7 \\ 1 & 1.814\ 2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y'_{\text{RGB}} \\ U'_{\text{RGB}} - 128 \\ V'_{\text{RGB}} - 128 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

由于防止超越动态范围的保护带, 彩色信号的量化范围仅有 220 级, 即被压缩 $219/255 = 0.8588$ 。因为必须在显示终端重现信号的动态范围, 更确切地说显示器处理的 RGB 数据范围是 $0 \sim 255$, 所以压缩的彩色信号应该扩展 $255/219 = 1.1644^{[28]}$ 。此时, 解码方程可表示为:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.164\ 4 & 0 & 1.792\ 7 \\ 1.164\ 4 & -0.213\ 2 & -0.533\ 0 \\ 1.164\ 4 & 2.112\ 4 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y'_{\text{RGB}} - 16 \\ U'_{\text{RGB}} - 128 \\ V'_{\text{RGB}} - 128 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中, R 、 G 和 B 分别代表重现的量化 RGB 信号。

3.2 XGB 颜色空间的编码和解码

由于迄今为止没有传输 XGB 三原色图像和视频的标准, 因此, XGB 情况下发送的 YUV 信号可以表示为三原色 X 、 B 和 G 的线性组合:

$$\begin{cases} Y_{\text{XGB}} = a_1 X_0 + b_1 B_0 + c_1 G_0 \\ U_{\text{XGB}} = a_2 X_0 + b_2 B_0 + c_2 G_0, \\ V_{\text{XGB}} = a_3 X_0 + b_3 B_0 + c_3 G_0 \end{cases}, \quad (7)$$

式中, a_n, b_n, c_n ($n = 1, 2, 3$) 分别为彩色信号 X_0, B_0 和 G_0 的压缩系数。为了使 $Y_{\text{XGB}}, U_{\text{XGB}}$ 和 V_{XGB} 的标称范围在 $[0, 1]$ 内, 应满足以下条件:

$$\begin{cases} 0 \leq a_1 + b_1 + c_1 \leq 1 \\ 0 \leq a_2 + b_2 + c_2 \leq 1, \\ 0 \leq a_3 + b_3 + c_3 \leq 1 \end{cases}. \quad (8)$$

为了符合 BT.709, 当使用 8 位量化时, 与 RGB 情况相同, Y'_{XGB} 的范围是 $[16, 235]$, 并且 U'_{XGB} 和 V'_{XGB} 的范围是 $[16, 240]$ 。因此, XGB 和 YUV 系统可以由方程(9)和(10)表示:

$$\begin{cases} X' = \text{INT}(219 X_0 + 16) \\ B' = \text{INT}(219 B_0 + 16), \\ G' = \text{INT}(219 G_0 + 16) \end{cases}, \quad (9)$$

$$\begin{cases} Y'_{\text{XGB}} = \text{INT}(219 Y_{\text{XGB}} + 16) \\ U'_{\text{XGB}} = \text{INT}(224 U_{\text{XGB}} + 16), \\ V'_{\text{XGB}} = \text{INT}(224 V_{\text{XGB}} + 16) \end{cases}, \quad (10)$$

式中: X', G' 和 B' 代表量化的 XGB 色彩信号; Y'_{XGB} 是 XGB 情况下量化的亮度信号, U'_{XGB} 和 V'_{XGB} 是 XGB 情况下量化的两个色差信号。

本文使 Y_{XGB} 仅依赖于 X , U_{XGB} 仅依赖于 B , 而 V_{XGB} 仅依赖于 G 来提高盲识别的成功率。这里成功率指: 如果 YUV 来自 RGB 颜色空间, 则从 YUV 数据流中解码出 RGB 颜色; 如果 YUV 来自 XGB 颜色空间, 则从 YUV 数据流中解码出 XGB 颜色。所以方程(7)可以转换为方程(11):

$$\begin{cases} Y_{\text{XGB}} = a_1 X_0 \\ U_{\text{XGB}} = b_2 B_0, \\ V_{\text{XGB}} = c_3 G_0 \end{cases}. \quad (11)$$

因为只存在 3 个系数, 即 a_1, b_2 和 c_3 , 所以方程(10)简化为方程式(12):

$$\begin{cases} Y'_{\text{XGB}} = \text{INT}(a_1 X' - 16 a_1 + 16) \\ U'_{\text{XGB}} = \text{INT}[(b_2 B' - 16 b_2) \times \frac{224}{219} + 16] \\ V'_{\text{XGB}} = \text{INT}[(c_3 G' - 16 c_3) \times \frac{224}{219} + 16] \end{cases}. \quad (12)$$

3.3 盲识别 YUV 数据来源的方法

彩色电视采用 YUV 空间是为了用亮度信号 Y 解决彩色电视机与黑白电视机的兼容问题, 使黑白电视机也能接收彩色电视信号。本文讨论的方法是使四原彩色电视能够接收和显示四原色视频图像, 以扩展色域。RGB 视频图像源可以通过本文方法在能够呈现 RGB 和 X 原色的宽色域显示器正确显示, 然而 RGBX 视频图像源不能在仅支持 RGB 的传统显示设备上显示扩展色域。因此本文提出的四原色表示方法与仅支持 RGB 的传统显示设备没有前向兼容性。由于基于 RGB 三原色的显示器不能显示 X 原色, 如果普通 RGB 显示器接收到图像中采用 XGB 表达的区

域,则 R 分量设置为 0。实际上,基于 RGB 三原色的相机拍摄的超出 RGB 色域的情况亦是置 R 为 0,因为在这种情况下 RGB 图像传感器的 R 单元输出为 0。相反,能够呈现 RGB 和 X 原色的宽色域显示器,可以重现由 RGB 混合的色光和由 XGB 混合的色光,如图 4 所示。

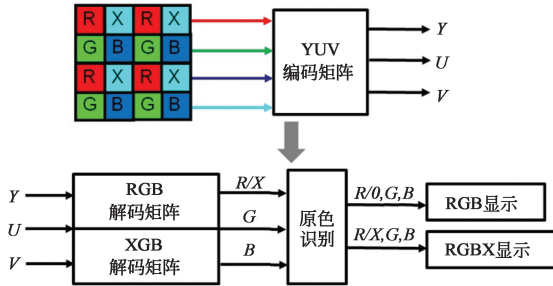


图 4 RGBX 四原色视频系统

Fig.4 RGBX four-primary video system

由四原色摄像机获得的四分量信号 RGBX, 经过类似图 2 的多边形分析后,产生两种表达方式:(1)对于能用 CIE 1931 标准表达的复合色彩信号,继续由 RGB 三原色组成的三角形进行表达。由 RGB 三原色形成节省频带的亮度信号 Y 以及 U 和 V 两个色差信号;(2)对于不能用 CIE 1931 标准表达的复合色彩信号,则采用由 XGB 组成的三角形进行表达,由 XGB 三原色信号形成相应亮度信号 Y 和两个色差信号 U 和 V 。本文利用 XGB 和 RGB 颜色空间之间的编码矩阵差异来盲识别 YUV 数据的来源。对于图像的 RGB 区域,传输的 YUV 信号经过 RGB 解码方程求解时得到的三原色信号幅值范围为 $0 \sim 255$ 。因为能通过 RGB 三原色表达的图像区域和不能通过 RGB 三原色表达的图像区域会出现在一幅图像上,所以对于图像的 XGB 区域,本文首先将传输的 YUV 信号也经过 RGB 解码方程求解,但是使得解码得到的三原色为奇异值。更确切地说,当接收端应用 RGB 解码矩阵从 Y'_{XGB} , U'_{XGB} 和 V'_{XGB} 数据流中恢复三原色信号时,将出现负值或大于 255 的情况,显示端可以依此判定,在信源端传输了 XGB 三原色信号,再经过 XGB 解码方程解出正确的 XGB 信号。具体实现过程如图 5 所示。

如图 5 所示,接收端识别 YUV 信号数据来源的具体过程如下:在接收端,应用 RGB 解码矩阵从接收的 YUV 信号解出三原色信号 R 或 X

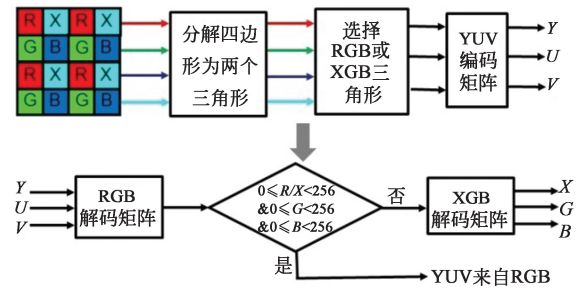


图 5 YUV 信号的形成和 YUV 信号源的盲识别

Fig. 5 Formation of YUV signals and blind identification of YUV signals source

(因为接收信号可能来自 R 或 X ,所以它被表示为 R/X)、 G 、 B 信号。如果 R/X 、 G 和 B 的值都在 $0 \sim 255$ 之间,则复合色光是由 RGB 三原色混合而成;如果 R/X 、 G 和 B 值中的至少一个小于 0 或大于 255,则复合色光是由 XGB 三原色混合而成。

有效识别 YUV 数据源的前提条件是 $220 \times 220 \times 220$ 组合(如前所述,XGB 信号的量化范围为 $16 \sim 235$,具有 220 级)情况下应出现奇异值。XGB 情况压缩系数的不同将导致不同的成功识别率,因此压缩系数的选择很关键。计算压缩系数的不同组合及其相应的成功识别率的过程如图 6 所示。

图 6 给出了计算压缩系数 a_1 、 b_2 和 c_3 的主要步骤,旨在提高 YUV 数据源的成功识别率:

(1)将成功识别的数量(成功识别为 XGB 情况)'amount'初始化为 0,并将压缩系数 a_1 、 b_2 和 c_3 初始化为 1,即最大值;

(2)在编码端初始化 XGB 信号的量化值,即方程(9)中的 X' 、 G' 和 B' ;

(3)通过 XGB 编码矩阵对 XGB 信号进行编码,以根据方程(11)和(12)获得 YUV 信号;

(4)通过 RGB 解码矩阵对 YUV 信号进行解码,以重现 XGB 信号;

(5)检查重现的 XGB 信号是否具有奇异值:如果是,即认为是 XGB 情况,则'amount'增加 1;如果不是,即认为是 RGB 情况,那么'amount'保持不变;

(6)检查 X' 、 G' 和 B' 是否增加到 235:如果是,则计算成功识别率(即 $\text{amount}/220^3$),输出 a_1 、 b_2 、 c_3 和相应的成功识别率,设定'amount'为 0;如果不是,将 X' 、 G' 和 B' 依次增加 1,然后返回

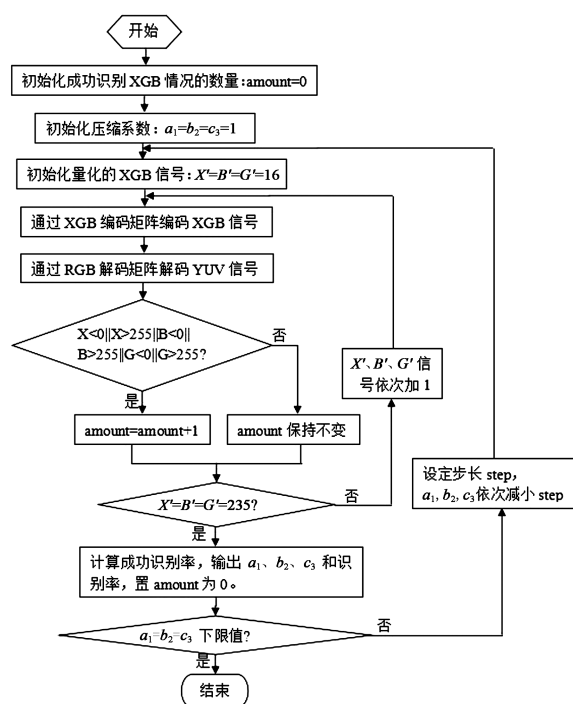


图 6 计算压缩系数方框图

Fig.6 Schematic diagram of calculating the compression factors

步骤(3);

(7)检查 a_1 、 b_2 和 c_3 是否降低到下限(以保证 YUV 包含所有 XGB 信息, a_1 、 b_2 和 c_3 都不为 0): 如果是, 则程序结束; 如果不是, 则设置步长(小值, 例如 0.1)并依次减小 a_1 、 b_2 和 c_3 的值, 然后返回步骤(4)。

4 测试实验与结果分析

4.1 盲识别成功率及压缩系数的确定

选择压缩系数有两个标准: 首先成功识别率尽可能高; 其次压缩系数尽可能大。根据上述标准, 在图 6 中将下限设置为 0.2, 并将步长设置为 0.1 时, 所有 a_1 、 b_2 和 c_3 的可能组合的成功识别率由图 6 中所示的方框图产生。如果第一组的 a_1 、 b_2 和 c_3 之和小于或等于第二组, 但第一组的成功识别率小于第二组, 则忽略第一组并保存第二组。有意义的结果值列在表 1 中。

本文采用典型的 USC-SIPI 图像数据库 Miscellaneous 标准彩色测试图像在 Matlab 仿真平台上来验证上述方案的可行性。首先, 从测试图像中提取 RGB 信号。由于目前没有能够输出

表 1 不同压缩系数的成功识别率

Tab.1 Successful identification rates vs. different compression factors

序号	a_1	b_2	c_3	成功识别率/%
1	0.5	0.2	1	100
2	0.3	0.3	1	100
3	0.4	0.3	1	99.841
4	0.6	0.2	1	99.674
5	0.7	0.2	1	97.231
6	0.8	0.2	1	94.089
7	1	0.2	1	92.925
8	0.5	0.4	1	91.506
9	0.7	0.3	1	90.991
10	1	1	1	75.562

RGBX 图像的相机, 假设测试图像是由 XGB 信号生成的, 即 X 信号由 R 信号代替, 以达到验证目的。然后通过 XGB 编码矩阵将提取的 XGB 信号转换为 YUV 信号。最后, 通过 RGB 解码矩阵对 YUV 信号进行解码, 并确定重现的 XGB 信号是否具有奇异值, 从而计算成功识别率。

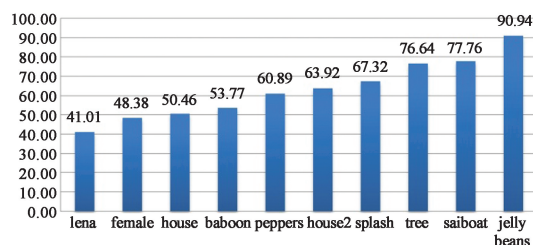


图 7 成功识别率

Fig.7 Successful identification rates

如表 1 所示, 当根本没有压缩时, 即 $a_1=b_2=c_3=1$ 时, 成功识别率仅为 75.562%, 此时被测试图像的成功识别率较低, 如图 7 所示。因此, 未压缩的系数情况不适合于四原色图像数据流中 RGB 和 XGB 颜色空间的盲识别。

选择 $a_1=0.5$ 、 $b_2=0.2$ 、 $c_3=1$ 作为最合适的压缩系数后, 它们在确保完全识别的前提下的准确度增加到小数点后四位, 如 RGB 情况。最终计算的压缩系数是 $a_1=0.5045$ 、 $b_2=0.2254$ 和 $c_3=1.000$ 。将它们代入方程(12), XGB 信号和 YUV 颜色空间数据可以通过方程(13)和(14)相互转换:

$$\begin{bmatrix} Y'_{\text{XGB}} \\ U'_{\text{XGB}} \\ V'_{\text{XGB}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.504\ 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.230\ 5 & 0 \\ 0 & 0 & 1.022\ 8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ B' \\ G' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 8 \\ 12 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

如上所述,RGB 情况下的 R 、 G 和 B 色差信号需要被压缩到一定程度。比较公式(13)与公式(4),可以得出结论,虽然 XGB 情况下的 X 和 B 信号比 RGB 情况下的 R 和 B 信号压缩得多,但 XGB 情况下的 G 信号没有被压缩,这更符合人类视觉特征。

$$\begin{bmatrix} X' \\ B' \\ G' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.983\ 3 & 0 & 0 \\ 0 & 4.312\ 7 & 0 \\ 0 & 0 & 0.977\ 7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y'_{\text{XGB}} - 8 \\ U'_{\text{XGB}} - 12 \\ V'_{\text{XGB}} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

因为显示器要处理的 XGB 数据的范围是 $0 \sim 255$,所以 Y'_{XGB} 应该扩展 $255/219/0.504\ 5 = 2.308\ 0$, U'_{XGB} 应该扩展 $255/224/0.225\ 4 = 5.050\ 5$ 和 V'_{XGB} 应扩展 $255/224 = 1.138\ 4$ 。此时,解码方程可表示如下:

$$\begin{bmatrix} X \\ B \\ G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.3080 & 0 & 0 \\ 0 & 5.050\ 5 & 0 \\ 0 & 0 & 1.138\ 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y'_{\text{XGB}} - 16 \\ U'_{\text{XGB}} - 16 \\ V'_{\text{XGB}} - 16 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

其中: X 、 G 和 B 分别代表重现的量化 XGB 信号。

在使用由等式(15)获得的矩阵计算之后,测试图像的成功识别率均为 100%。

4.2 JPEG 编码下的 RGB 与 XGB 图像质量评估

由于本文 XGB 情况下的编码方法压缩了 Y 、 U 和 V 的信号值,但未对其进行去相关,因此除了对成功识别率的评估之外,本节示出 RGB 与 XGB 图像经 JPEG 压缩后解码重构的图像,并计算 RGB 与 XGB 图像数据压缩率以评估所提出的编码方法的编码效率。由于目前无法获得 X 色信号,类似于成功识别率的计算过程,假设测试图像是由 XGB 信号生成的,用于验证目的。首先,从测试图像中提取 RGB 信号。然后通过 XGB 编

码矩阵将提取的 RGB 信号转换为 YUV 信号。最后,执行 JPEG 编码与解码并计算压缩率(压缩率=原始图像尺寸/压缩图像尺寸)。压缩率越高,编码效率越高,反之,则说明编码效率较低。RGB 格式图像数据压缩率的计算过程同理。

图 8 示出测试图像分别在 RGB 和 XGB 格式下经过 JPEG 压缩并解码重构的图像。

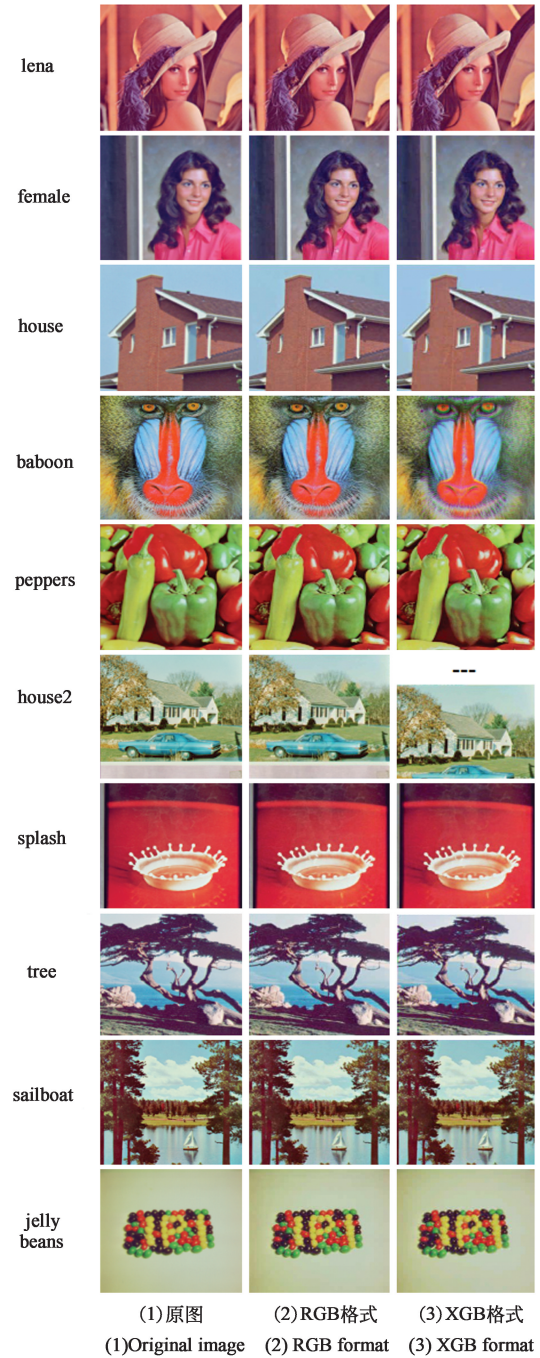


图 8 RGB 与 XGB 格式 JPEG 图像解码重构结果图
Fig. 8 Reconstruction results of RGB and XGB format JPEG images

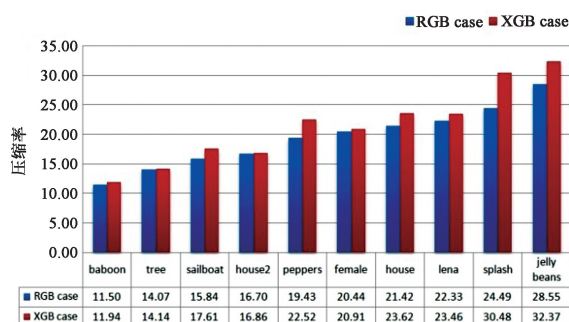


图 9 RGB 与 XGB 格式图像压缩率对比图

Fig.9 Comparison of compression ratio of RGB and XGB format images

压缩率测试结果如图 9 所示, XGB 格式测试用图像的数据压缩率大于 RGB 格式, 数据压缩率可提升 0.07~5.99。结果证明了利用通用三原色信道将四原色彩色图像表示为通用 YUV 图像格式, 进行视频图像传输的可行性。

4.3 10/12 bit 位宽结果

根据上述方法计算并验证具有 10 bit 编码格式的 BT.709 RGB 原色和具有 10/12 bit 编码格

式的 BT.2020 RGB 原色的情况, 结果列于表 2 中。当 RGB 为 BT.2020 原色时, 由 R、G、B、X 构成的四边形的色域如图 10 所示。当 X 位于图 10 的青色区域内时, RGBX 四原色不仅可以完全覆盖、甚至远远超出 Pointer 色域。

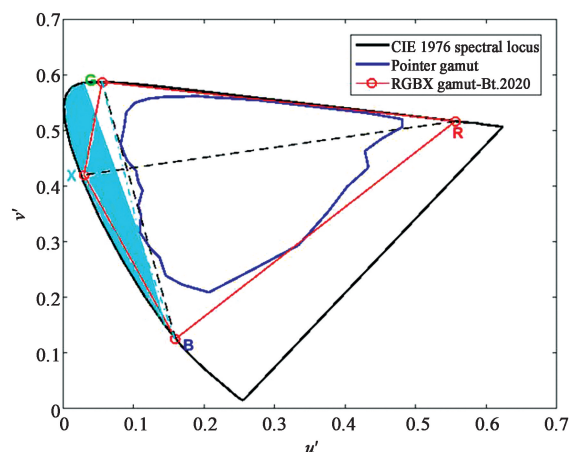


图 10 由 RGBX 四原色构成的色域 (RGB 为 BT.2020 原色)

Fig.10 Gamut constituted by R, G, B, X (RGB are primaries specified by BT.2020)

表 2 不同位宽下 RGBX 表示的编解码参数及相关特性

Tab.2 Parameters and characteristics of RGBX presentations

	BT.709(HDTV)	BT.2020(UHDTV)
由 RGB 表达的色光		
亮度信号(Y_{RGB})	$Y_{RGB} = 0.2126R_0 + 0.7152G_0 + 0.0722B_0$	$Y_{RGB} = 0.2627R_0 + 0.6780G_0 + 0.0593B_0$
色差信号	$U_{RGB} = 0.5389(B_0 - Y_{RGB})$	$U_{RGB} = 0.5315(B_0 - Y_{RGB})$
(U_{RGB}, V_{RGB})	$V_{RGB} = 0.6350(R_0 - Y_{RGB})$	$V_{RGB} = 0.6782(R_0 - Y_{RGB})$
$R_0, G_0, B_0, Y_{RGB}, U_{RGB}, V_{RGB}$ 的量化		
	$R' = \text{INT}[(219 \times R_0 + 16) \times 2^{n-8}]$ $G' = \text{INT}[(219 \times G_0 + 16) \times 2^{n-8}]$ $B' = \text{INT}[(219 \times B_0 + 16) \times 2^{n-8}]$ $Y'_{RGB} = \text{INT}[(219 \times Y_{RGB} + 16) \times 2^{n-8}]$ $U'_{RGB} = \text{INT}[(224 \times U_{RGB} + 128) \times 2^{n-8}]$ $V'_{RGB} = \text{INT}[(224 \times V_{RGB} + 128) \times 2^{n-8}]$	
编码方程	$\begin{bmatrix} Y'_{RGB} \\ U'_{RGB} \\ V'_{RGB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ -0.1172 & -0.3942 & 0.5114 \\ 0.5114 & -0.4645 & -0.0469 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 2^{n-1} \\ 2^{n-1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Y'_{RGB} \\ U'_{RGB} \\ V'_{RGB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2627 & 0.6780 & 0.0593 \\ -0.1428 & -0.3686 & 0.5114 \\ 0.5114 & -0.4703 & -0.0411 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 2^{n-1} \\ 2^{n-1} \end{bmatrix}$

续 表

	BT.709(HDTV)	BT.2020(UHDTV)
解码方程	$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.164\ 4 & 0 & 1.792\ 7 \\ 1.164\ 4 & -0.213\ 2 & -0.533\ 0 \\ 1.164\ 4 & 2.112\ 4 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y'_{\text{RGB}} - 16 \times 2^{n-8} \\ U'_{\text{RGB}} - 128 \times 2^{n-8} \\ V'_{\text{RGB}} - 128 \times 2^{n-8} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.164\ 4 & 0 & 1.678\ 6 \\ 1.164\ 4 & -0.187\ 3 & -0.650\ 4 \\ 1.164\ 4 & 2.141\ 8 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y'_{\text{RGB}} - 16 \times 2^{n-8} \\ U'_{\text{RGB}} - 128 \times 2^{n-8} \\ V'_{\text{RGB}} - 128 \times 2^{n-8} \end{bmatrix}$
由 XGB 表达的色光		
亮度信号(Y_{XGB})	$Y_{\text{XGB}} = 0.5045X_0$	$Y_{\text{XGB}} = 0.5045X_0$
色差信号	$U_{\text{XGB}} = 0.2254B_0$	$U_{\text{XGB}} = 0.2299B_0$
$(U_{\text{XGB}}, V_{\text{XGB}})$	$V_{\text{XGB}} = G_0$	$V_{\text{XGB}} = G_0$
$X_0, G_0, B_0, Y_{\text{XGB}},$ $U_{\text{XGB}}, V_{\text{XGB}}$ 的量化	$\begin{aligned} X' &= \text{INT}[(219 \times X_0 + 16) \times 2^{n-8}] \\ G' &= \text{INT}[(219 \times G_0 + 16) \times 2^{n-8}] \\ B' &= \text{INT}[(219 \times B_0 + 16) \times 2^{n-8}] \\ Y'_{\text{XGB}} &= \text{INT}[(219 \times Y_{\text{XGB}} + 16) \times 2^{n-8}] \\ U'_{\text{XGB}} &= \text{INT}[(224 \times U_{\text{XGB}} + 16) \times 2^{n-8}] \\ V'_{\text{XGB}} &= \text{INT}[(224 \times V_{\text{XGB}} + 16) \times 2^{n-8}] \end{aligned}$	
编码方程	$\begin{bmatrix} Y'_{\text{XGB}} \\ U'_{\text{XGB}} \\ V'_{\text{XGB}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.504\ 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.230\ 5 & 0 \\ 0 & 0 & 1.022\ 8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ B' \\ G' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 8 \times 2^{n-8} \\ 12 \times 2^{n-8} \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Y'_{\text{XGB}} \\ U'_{\text{XGB}} \\ V'_{\text{XGB}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.504\ 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.235\ 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1.022\ 8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ B' \\ G' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 8 \times 2^{n-8} \\ 12 \times 2^{n-8} \\ 0 \end{bmatrix}$
解码方程	$\begin{bmatrix} X \\ B \\ G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.308\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5.050\ 5 & 0 \\ 0 & 0 & 1.138\ 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y'_{\text{XGB}} - 16 \times 2^{n-8} \\ U'_{\text{XGB}} - 16 \times 2^{n-8} \\ V'_{\text{XGB}} - 16 \times 2^{n-8} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} X \\ B \\ G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.308\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4.952\ 7 & 0 \\ 0 & 0 & 1.138\ 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y'_{\text{XGB}} - 16 \times 2^{n-8} \\ U'_{\text{XGB}} - 16 \times 2^{n-8} \\ V'_{\text{XGB}} - 16 \times 2^{n-8} \end{bmatrix}$

5 结 论

扩展视频源的色域范围是扩展显示器的色域范围的前提。多原色视频传感器和多原色显示器的数据传输需要多原色传输与编码方法。因此, 本文提出了一种基于三原色信道传输四原色图像

数据的颜色表示方法。为了在三原色通道兼容传输四原色信息, 由 RGB 和 X 构成的四边形被分解为 RGB 以及 XGB 三角形。本文设定了 XGB 颜色空间的编解码方程, 并且在解码端可以盲识别 YUV 信号来自于 RGB 还是 XGB 颜色空间。利用 JPEG 图像压缩算法测试其 YUV 序列, 相较于 RGB 三原色系统, 数据压缩率可提升 0.07~

5.99,色域覆盖率远远超过 Pointer 色域,更加接近人眼可视色域。实验结果证明了本文方法的可行性,因此本文描述的盲识别方案有助于实现四原色视频系统。将来,可以在 XGB 颜色空间中提

出 YUV 的其他编码方案,例如更加优化的颜色分量去相关方案,以有助于传输四原色图像和视频内容的标准化。

参 考 文 献:

- [1] ITU. ITU-R BT.709-5 Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange [S]. Geneva: International Telecommunications Union, 2002.
- [2] Growing importance of color in a world of displays and data [EB/OL]. (2015-10-27)[2019-08-01]. http://rohs.exemptions.oeko.info/fileadmin/user_upload/RoHS_Pack_10/Cd_QD_Exs_QD_Vision_c_Importance_of_Quality_in_Displays.pdf.
- [3] YUREK J. Watching the world cup finals this weekend? Your HDTV probably can't show off Messi's boots in all their bright blue glory [EB/OL]. (2014-07-14)[2019-08-01]. <https://dot-color.com/2014/07/11/watching-the-world-cup-finals-this-weekend-on-your-hdtv-youre-not-getting-the-whole-picture/>.
- [4] IEC. IEC 61966-2-4 Multimedia systems and equipment-colour measurement and management-Part 2-4: colour management-extended-gamut YCC colour space for video applications-xvYCC [S]. Geneva: IEC, 2006.
- [5] XU Y, LI Y, LI G L. Two kinds of methods to extend the color gamut of DTV system with extended quantization levels [C]//*Proceedings of the 2009 2nd International Congress on Image and Signal*. Tianjin, China: IEEE, 2009: 1-4.
- [6] ITU. ITU-R BT. 2020-2 Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange [S]. ITU, 2012.
- [7] POINTER M R. The gamut of real surface colours [J]. *Color Research and Application*, 1980, 5(3): 145-155.
- [8] CHINNOCK C. *The Status of Wide Color Gamut UHD-TVs* [M]. USA: Insight Media, 2016.
- [9] DUAN L, LEI Z C. Wide color gamut display with white and emerald backlighting [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(6): 1338-1344.
- [10] HIRAI K, IRIE D, HORIUCHI T. Multi-primary image projector using programmable spectral light source [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2016, 24(3): 144-153.
- [11] MANDELLI E. Quantum dot based imagers for multispectral cameras and sensors [C]//*Proceedings of 2016 IEEE Hot Chips 28 Symposium*. Cupertino: IEEE, 2016: 1-30.
- [12] LUO Z Y, WU S H. A spatiotemporal four-primary color LCD with quantum dots [J]. *Journal of Display Technology*, 2014, 10(5): 367-372.
- [13] 徐梦层,李昌禄,雷志春.宽色域液晶显示系统的研究[J].*液晶与显示*, 2018, 33(7): 606-614.
XU M C, LI C L, LEI Z C. Wide color gamut liquid crystal display system [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(7): 606-614. (in Chinese)
- [14] SUGIURA H, KAGAWA S, KANEKO H, et al. Wide color gamut displays using LED backlight - signal processing circuits, color calibration system and multi-primaries [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing* 2005. Genova: IEEE, 2005: II-9.
- [15] HINNEN K J G, LANGENDIJK E H A, HAMMER M. Ultra wide-gamut LCD using a local multi-spectral backlight [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2011, 42(1): 669-672.
- [16] XIONG Y, DENG F, XU S, et al. Performance analysis of multi-primary color display based on OLEDs/PLEDs [J]. *Optics Communications*, 2017, 398: 49-55.
- [17] WANG Y C, HUANG B S, HSIEH K S, et al. Comparative evaluation of the imaging performance of multi-primary color LCDs with RGBW and RGBY pixel units by simulation [J]. *Journal of Display Technology*, 2014, 10(9): 729-736.
- [18] TERAGAWA M, YOSHIDA A, YOSHIYAMA K, et al. Multi-primary-color displays: the latest technologies

- and their benefits [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2012, 20(1): 1-11.
- [19] DAWSON S. Sharp LC70LE735X review: sharp aquos quattron LC70LE735X [EB/OL]. (2012-07-27)[2019-08-01]. <https://www.cnet.com/au/products/sharp-lc70le735x/review/>.
- [20] CHENG H C, DAVID I B, WU S H. Five-primary-color LCDs [J]. *Journal of Display Technology*, 2010, 6(1): 3-7.
- [21] CHEN L, TU Y, WANG L L, *et al.* Perceptual evaluation of sub-pixel rendering in a four-primary display system [C]//*Proceedings of the 2009 2nd International Congress on Image and Signal Processing*. Tianjin, China: IEEE, 2009: 1-5.
- [22] MANG Y O, HUANG S H. Design considerations between color gamut and brightness for multi-primary color displays [J]. *Journal of Display Technology*, 2007, 3(1): 71-82.
- [23] MURAKAMI Y, ISHII J I, OBI T, *et al.* Color conversion method for multi-primary display for spectral color reproduction [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, 13(4): 701-708.
- [24] SHARMA G. *Digital Color Imaging Handbook* [M]. Boca Raton: CRC Press, 2003.
- [25] SONY. Realization of natural color reproduction in digital still cameras, closer to the natural sight perception of the human eye [EB/OL]. (2013-07-16)[2019-08-01]. https://www.sony.net/SonyInfo/News/Press_Archive/200307/03-029E/.
- [26] FRANÇOIS E, FOGG C, HE Y W, *et al.* High dynamic range and wide color gamut video coding in HEVC: status and potential future enhancements [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2016, 26(1): 63-75.
- [27] ARTUSI A, MANTIUK R K, RICHTER T, *et al.* JPEG XT: a compression standard for HDR and WCG images [standards in a nutshell] [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2016, 33(2): 118-124.
- [28] 俞斯乐. 电视原理[M]. 6 版. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- YU S L. *The Principle of Television* [M]. 6th ed. Beijing: National Defend Industry Press, 2005.

作者简介:



宇 欣(1995—),女,河北张家口人,硕士研究生,2017 年于河北工业大学获得学士学位,主要从事 HDR-WCG 视频传输与显示方面的研究。E-mail: silviayu@tju.edu.cn



雷志春(1964—),男,河北省迁安人,博士,教授,1998 年于德国多特蒙德大学获得博士学位,主要从事 HDR-WCG 视频显示、图像处理方面的研究。E-mail: zclei@tju.edu.cn