

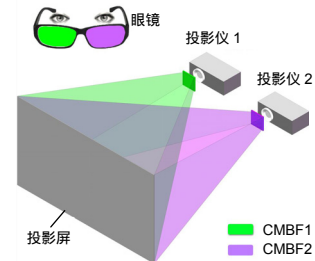


DOI: 10.12086/oe.2020.190334

基于互补式多波段带通滤光片的 3D 投影显示系统

戚李阳, 徐 斌, 王元庆*

南京大学立体影像技术实验室, 江苏 南京 210046



摘要: 本文提出一个基于互补式多波段带通滤光片的 3D 投影显示系统, 该系统可以使观看者通过特制眼镜获得 3D 视觉体验。不同于时分复用和空分复用的 3D 显示系统, 该系统借助成对的互补式滤光片实现谱分复用。通过设计可以实现两块滤光片的三对互补通带恰好分别覆盖 RGB 三色光谱范围, 且每对互补通带相互交错几乎不重叠。在本文中, 将两台普通的 2D 投影机改造成 3D 投影系统, 并测量了该系统的光谱、亮度、串扰等参数, 其平均串扰 3%, 满足 3D 显示串扰小于 10% 的基本要求。

关键词: 3D 显示; 互补式多波段带通滤光片; 投影系统; 串扰

中图分类号: TN27

文献标志码: A

引用格式: 戚李阳, 徐斌, 王元庆. 基于互补式多波段带通滤光片的 3D 投影显示系统[J]. 光电工程, 2020, 47(7): 190334

A 3D projection system based on complementary multiband bandpass filter

Qi Liyang, Xu Bin, Wang Yuanqin*

Stereo Image Technology Lab, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210046, China

Abstract: A 3D projection system based on complementary multiband bandpass filter (CMBF) is proposed in this paper, which enables viewers to gain 3D experience through special glasses. Different from the time-multiplex or the spatial-multiplex system, it is a spectrum-multiplex system using pairs of CMBFs. The three pairs of complementary bandpass of a pair of CMBFs can be designed to cover the three spectrum ranges of RGB individually and in each pair the two bandpass nearly do not overlap. In this paper, a 3D projection system is built from two ordinary projectors and its spectrum, brightness and crosstalk have been measured. The average crosstalk is 3%, meeting the basic requirement of crosstalk in 3D display which is less than 10%.

Keywords: 3D display; complementary multiband bandpass filter; projection system; crosstalk

Citation: Qi L Y, Xu B, Wang Y Q. A 3D projection system based on complementary multiband bandpass filter[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(7): 190334

1 引言

在过去的数十年里, 大量 3D 显示技术的提出掀

起了电影市场的革命。3D 显示根据引起人体立体视觉的不同可区分为双目视差型 3D 显示和真 3D 显示^[1]。

收稿日期: 2019-06-18; 收到修改稿日期: 2020-02-11

基金项目: 国家重点研发计划战略性先进电子材料重点专项资助项目(2016YFB0401503); 江苏省科技计划项目(BE2016173)

作者简介: 戚李阳(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事三维显示的研究。E-mail: qiliyang1995@163.com

通信作者: 王元庆(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光学电子和信息处理领域, 尤其是传感器、立体视觉与显示等方面的研究。E-mail: yqwang@nju.edu.cn

版权所有©2020 中国科学院光电技术研究所

真 3D 显示技术包含体 3D 显示、全息 3D 显示和集成成像 3D 显示。而双目视差型 3D 显示的基本原理是将两幅具有一定视差的图像分别提供给人的左眼和右眼观看,利用视差效应形成具有深度的立体视觉。双目视差型 3D 显示是当下实现 3D 显示的重要技术手段。

研究者们已经提出很多关于双目视差型 3D 显示的实现方法。自由式的 3D 显示主要借助空分复用的方法,例如基于视差屏障和指向背光的 3D 显示^[2-3]。这些方法的主要缺陷在于对 LCD 屏有严格的高刷新率要求和对观看位置有固定区域的限制^[4]。而借助于一些辅助器件,3D 显示更加容易实现,并且往往视觉效果也更好。在现代立体电影的发展史上,商业电影院先后采用了基于谱分复用、时分复用和偏振复用的镜片实现三维显示效果^[5]。谱分复用传统上是使用红-青、红-蓝等双色滤光片将摄影光路一分为二,在胶片上形成双色拷贝的图对,观众观看时佩戴对应的双色眼镜即可获得 3D 体验,但此方案的缺点在于光谱上的缺失,例如红-蓝双色眼镜会损失大量绿色频段的信息^[6-7];近年有专利提出使用红、绿、蓝三色滤光膜叠加形成整体上三通带的成对滤光片,可以在一定程度上解决这个问题^[8]。时分复用则是基于交替显示的画面和与之同步开关的镜片实现观看者眼镜只接收到对应图像,例如基于液晶开关眼镜实现 3D 显示技术^[9]。基于偏振式的技术则是当下商业电影院最多选用的方案^[10],在这种方法下,左右图像的光偏振方向不同,借助于偏振片,左右眼能获得对应的图像,但它的缺点也很明显,当观看角度变化时,串扰现象将会加剧,观看者会产生视觉疲惫和头晕现象。

在本文中,我们提出了一种基于互补式多波段带通滤光片的谱分复用的 3D 投影系统。相较于传统的

双色谱分复用立体显示方案,本文采用的滤光片拥有红、绿、蓝三色光谱范围内的三个分立通带,结合使用成对的互补滤光片,几乎可以覆盖全部的可见光波段,不存在某些频段内大量的信息缺失。而与专利^[8]提出的方案相比,本文的特点在于没有使用三块滤光膜叠加形成光谱上的三个通带,而是使用一块滤光片就可以达到同样的设计效果,避免了不必要的组合和叠加,工艺上更加稳定可靠。

根据提出的方案,在普通的 2D 投影系统基础上加入特制的互补式滤光片和一些控制电路,就可以获得一个表现良好的 3D 投影系统。本文针对该系统的相关参数进行了测量,其中平均串扰小于 3%。

2 原理和制备

2.1 谱分复用立体显示原理

整体系统核心部分是成对的互补式多波段带通滤光片(complementary multiband bandpass filter, CMBF),以下简称为互补滤光片或 CMBF。每个滤光片拥有多个光谱通带,分立分布在光谱的不同范围内。两个这样的滤光片构成一对,每对滤光片的通带相互交错而且几乎不重叠。在 3D 投影显示系统中,每对滤光片应当有三组通带,分别分布在蓝、绿、红三个光谱范围内,如图 1 所示。由于 CMBF 的固有特性,在每组通带中会存在着少量的重叠部分,如图 1(a)中黄色部分所示,这是造成显示时串扰的主要原因。

如图 1(b)所示,当系统工作时,从投影仪 1 中透过 CMBF1 投射出的光经过投影屏反射后,仅能通过同样覆盖有 CMBF1 的镜片进入右眼,左眼的情况同理。透过不同互补滤光片的左右图像通过投影屏反射后,仅能进该图像对应的眼睛内,由此可以实现立体

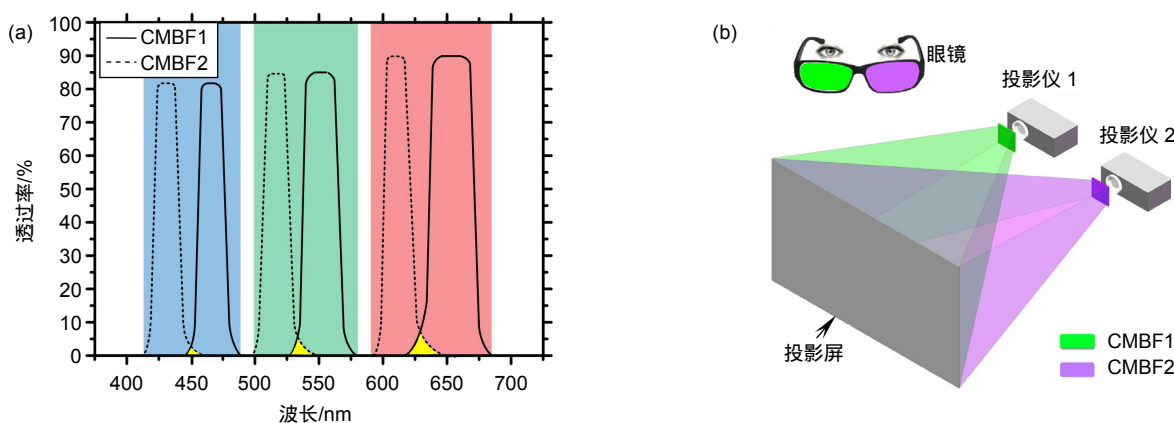


图 1 谱分复用立体显示原理。(a) CMBF 的光谱分布图; (b) 立体投影工作原理图

Fig. 1 The principle of spectrum-multiplex 3D display. (a) The spectrogram of CMBF; (b) The principle diagram of 3D projector

视觉。值得注意的是,在这种方法里,投影屏不需要特殊处理,可以使用任何传统投影仪使用的投影屏,甚至是白墙。

2.2 互补式多波段带通滤光片制备

为实现光谱复用的 3D 显示设备,需要制备相应的互补滤光片。依据薄膜干涉理论,不同光的干涉级次不同,调节薄膜的厚度可以控制不同频率的光发生相长干涉或者是相消干涉,加之光从光疏介质进入光密介质时,光会发生相位变化,从而通过不同介质在基板上交替叠层,可以设计得到一定频段的带通滤光片。在制备互补滤光片时,首先使用 Comsol 仿真软件对叠层结构进行仿真,以期滤光片光谱能接近图 1(a)中的分布,获取相应的参数后再进行实验验证和实际制备。

以 Nb_2O_5 和 SiO_2 为沉积材料,采用磁控溅射(HSP-1650)交替沉积两种材料构成多波段带通滤波

器。薄膜沉积过程中,腔体内充斥纯氧,交替使用硅靶和镍靶在玻璃基板(厚 0.8 mm)上进行沉积,沉积的第一层为 Nb_2O_5 。磁控溅射的环境记录如表 1。

在表 1 中, TG2 是镍靶、TG3/4 是硅靶,其对应的 Power 和 Ar 是为生成对应的氧化物沉积所需要的电压和氩气的流速,这两个参数影响沉积的速率和稳定性。而结合使用 ICP(离子束溅射)是为了弥补普通磁控溅射中反应气体离子化率较低、沉积物活性不足的缺点,从而使得制备成品率更高^[11]。

2.3 显示系统设备制备

图 1(b)表明,光谱复用立体显示系统需要两对互补式滤光片、两个常规的 2D 投影仪和相应的驱动电路。其中一对滤光片用于覆盖两台投影仪的镜头,另一对属性与前一队相同,用来制作光谱眼镜。如图 2。投影仪的参数由表 2 给出。

投影仪位置设置和实验场景实拍由图 3 给出。

表 1 磁控溅射的环境记录

Table 1 Recording of magnetron sputtering environment

材料	TG2(Nb)		TG3/4(Si)		ICP		
	电压/kV	Ar/(ml/min)	电压/kV	Ar/(ml/min)	电压/kV	Ar/(ml/min)	O ₂ /(ml/min)
Nb ₂ O ₅	10	30/30/40	/	30/30/40	3	40	250
SiO ₂	/	30/30/40	10	30/30/40	3	40	250

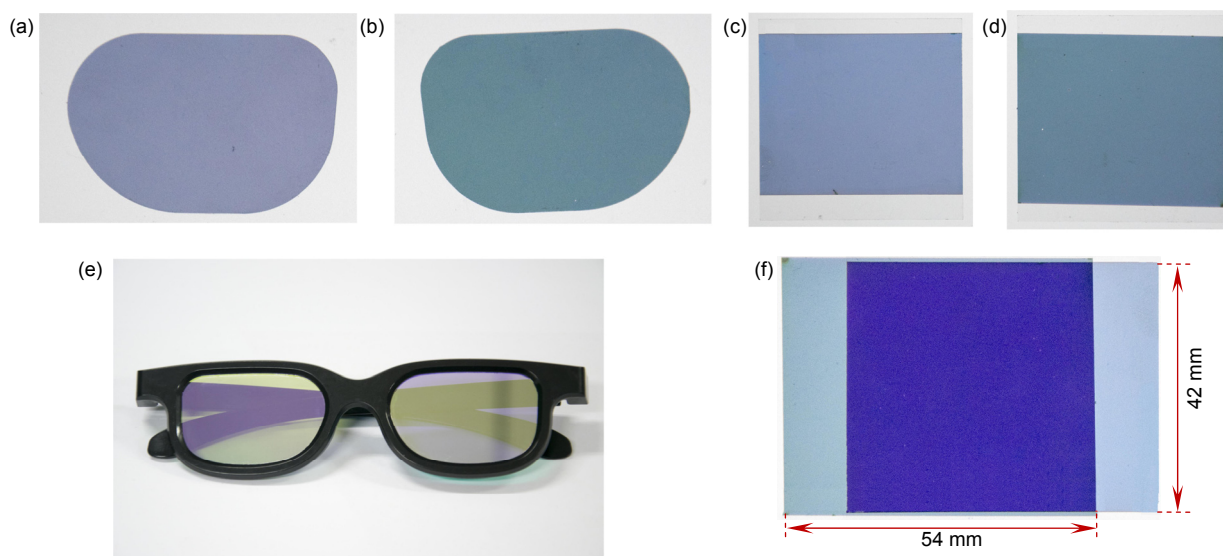


图 2 互补滤光片相关设备制备。(a), (b) 是由一对切割好的互补滤光片,用来构成图(e)中眼镜的两块镜片;(c), (d) 为一对覆盖在投影仪镜头的滤光片;(f) 是互补滤光片的相关尺寸和重叠效果

Fig. 2 CMBF-related equipment. (a), (b) are a pair of CMBFs prepared before to make the glasses in (e); (c), (d) are a pair of CMBFs to cover the projector lens; (f) is to show the size of the CMBF and the overlap of CMBFs

表 2 投影机参数

Table 2 Projector's parameters

分辨率	对比度	帧率/Hz	尺寸/cm	最佳距离/m	接口	功率/W
800×480	1000:1	60	18.7×14.9×7.7	2.5	HDMI	38

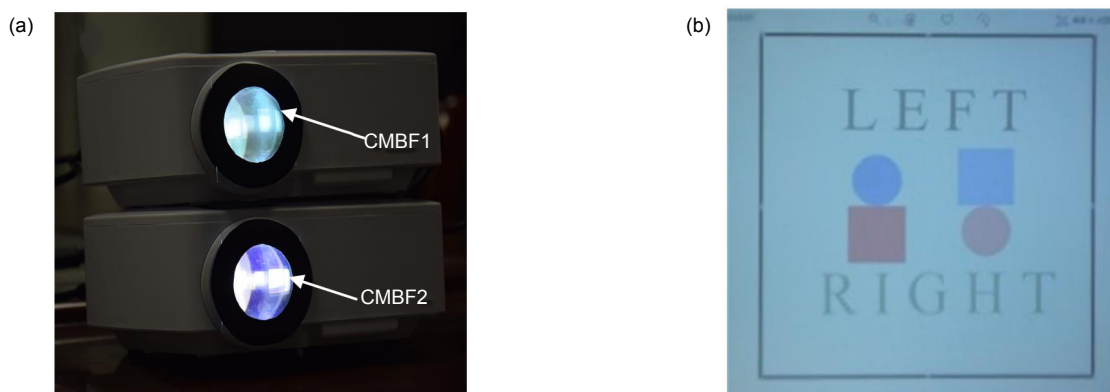


图 3 实验场景图。(a) 投影机设置方式；(b) 投影屏及部分实验投影内容

Fig. 3 Photos of experimental scene. (a) The settings of the projectors; (b) The screen and some experimental pictures

两台投影机之间的距离为 8 cm，投影屏幕到投影机的距离为 2.5 m，显示区域的对角线为 70 in(1 in=2.54 cm)。相应的驱动则由图 4 给出。

3 实验和分析

3.1 CMBF 的微观结构

图 5 是使用玻璃刀划开样本，液氮处理后再进行沉金，最终使用扫描电镜 Nova Nano SEM 230 测量得到的微观结构图。CMBF 的沉积区域为 54 mm×22 mm，大小足够覆盖投影机镜头，其沉积厚度分别为 4.29 μm 和 3.50 μm。图中可以清晰看到 CMBF 层叠交替的结构，除了最底层为玻璃基板外，其余各层为交替的不同厚度的 Nb₂O₅ 和 SiO₂。相应的厚度是在薄膜干涉理论指导下的由 Comsol 仿真确定。

3.2 CMBF 的光谱分析

从图 6 中可以看到，在入射角为 0°的情况下，CMBF1 有三个主要的通带范围，分别是 450 nm~475 nm，530 nm~560 nm 和 610 nm~640 nm；而 CMBF2 的三个主要通带范围分别是 400 nm~450 nm，500 nm~530 nm 和 580 nm~610 nm。同时也看到通带范围也受到光线入射角度的影响，当入射角度从 0°增加到 15°时，通带整体上向左移动，在图 6(c)、6(d)中重叠的部分是造成串扰的主要原因。

物理上蓝光波长分布在 400 nm~480 nm，绿光波长分布在 500 nm~560 nm，红光波长分布在 600 nm~700 nm。结合谱分立体显示原理中对光谱通带的要求，这样的互补式滤光片可以满足系统要求。

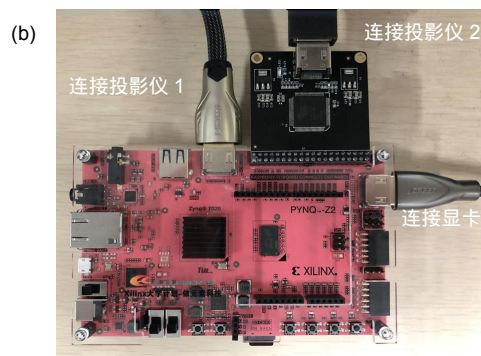
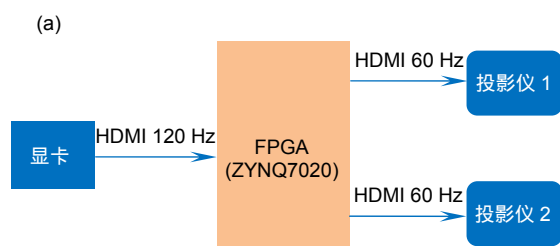


图 4 (a) 驱动电路示意图；(b) 实际拍摄图

Fig. 4 (a) Schematic diagram of driving circuit; (b) Photo of driving circuit

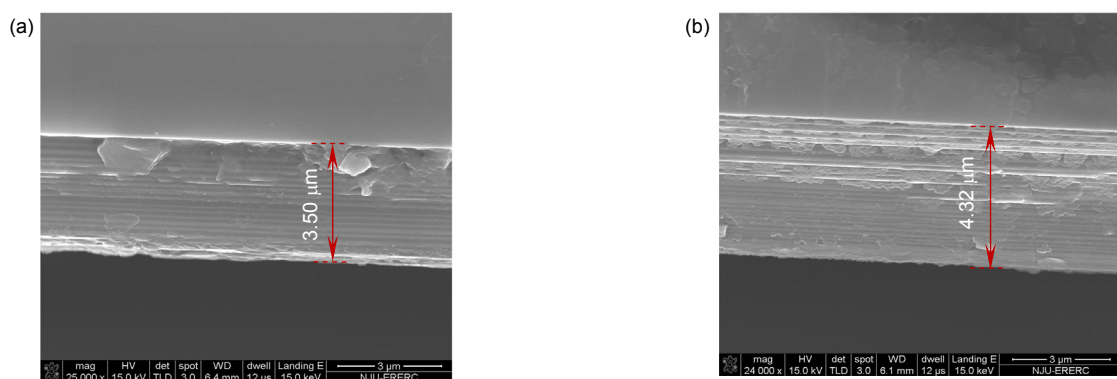


图5 CMBF 微观结构图。(a) 左侧 CMBF1; (b) 右侧 CMBF2

Fig. 5 The photo of the CMBF's microstructure. (a) On the left is CMBF1; (b) On the right is CMBF2

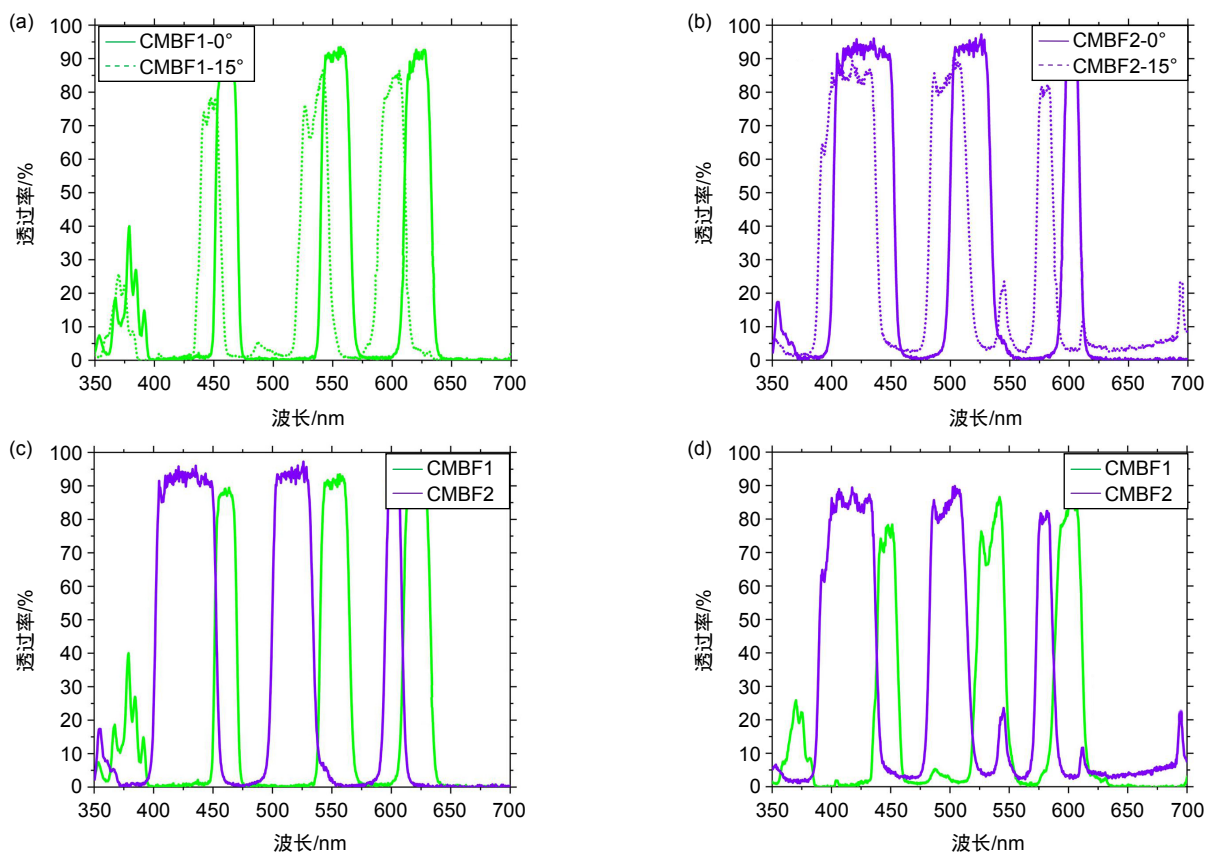


图6 CMBF 的光谱图。(a) CMBF1 在入射角 0° 和 15° 下的光谱图; (b) CMBF2 在入射角 0° 和 15° 下的光谱图; (c) 在入射角为 0° 时, CMBF1 和 CMBF2 的光谱图; (d) 入射角为 15° 时, CMBF1 和 CMBF2 的光谱图。光谱由 DH-2000-BAL 测量

Fig. 6 The spectrogram of CMBFs. (a) The spectrum of CMBF1 in different incident angle (0° and 15°); (b) The spectrum of CMBF2 in different incident angle (0° and 15°); (c) The spectrum of CMBF1 and CMBF2 in incidence of 0° ; (d) The spectrum of CMBF1 and CMBF2 in incidence of 15° . The optical spectrum is measured by DH-2000-BAL

3.3 立体显示实验

实验场景如图 1(b)和图 3 所示, 实际实验效果图如图 7 所示。

从图 7 中可以看到, 图 7(b)、7(d)是通过不同滤

光片的实际显示效果, 分别表现出作为原始图片的图 7(a)和图 7(c)的图形和色彩。总体的显示效果基本符合谱分复用的设计原理, 即透过 CMBF 只能看到对应的投影仪投射的图片, 从而能够实现立体显示的效果。

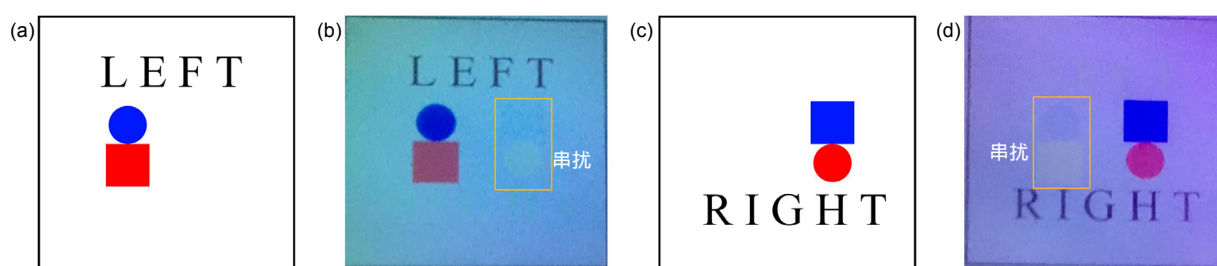


图 7 原始参考图和实验拍摄图。(a), (c) 分别是两台投影仪投射的原始图像;

(b), (d) 分别是相机透过左右两个镜片拍摄到的图像, 黄色框内为串扰

Fig. 7 Reference images and experimental photos. (a), (c) are the two images projected from two projectors; (b), (d) are the two photos taken by the camera through the two CMBFs, in which the yellow areas indicate the crosstalk

但是图 7(b)和图 7(d)之间存在一定色差, 且两者均存在一定程度的串扰。

3.4 显示色域的测量和分析

使用 CA-310 分析仪对图 3(a)中的两台分别覆有不同互补滤光片的投影仪进行色域测量, 并以原始的不带滤光片的投影仪作为参考。色彩空间采用(CIE, 1931)标准, 各色域以 ITU-R Recommendation BT.2020.(Rec.2020)作为参照对象。该测试使用红(0, 0, 255), 绿(0, 255, 0), 蓝(255, 0, 0), 白(255, 255, 255)作为测试图, 获得的色坐标如表 3 所示。

按照表 3 绘制出对应的色度图, 半透明黄色区域标记的是 Rec.2020 色域, 其标准白点坐标标记为 D65(0.3127, 0.3290), 绿色三角形标记的是 CMBF1 投影系统色域的范围, 紫色三角形标记的是 CMBF2 的投影系统色域的范围, 如图 8 所示。

可以看出, 图 8(b)与图 8(c)存在明显差异, 这是由于两块 CMBF 光谱差异造成的。由图 6 可知, CMBF2 的红绿蓝三色光谱通带相比于 CMBF1 整体上偏向蓝光一侧, 这与图 8(c)的色域相比于图 8(b)偏向蓝色是一致的。这也是图 7(b)和图 7(d)之间存在色差, 图 7(d)图像更加偏蓝的原因。

后期, 我们会在显示色差方面做进一步的改进。

可以使用 FPGA 对图像进行预处理, 采用数字图像校正的办法提前消除色差, 调整两台投影仪的输入图像, 从而使图 8(b), 8(c)中表征 CMBF1 和 CMBF2 的两个投影系统色域的三角形尽可能重合。

3.5 显示亮度的测量和分析

亮度测试中, 用一片 CMBF 模拟正常观看时的镜片, 使用 CA-310 分析仪模拟人眼。将 CMBF 置于 CA-310 探测端顶部, 按照图 9(a)标注好的角度逐步旋转测量, 获得一系列亮度测量值, 如图 9 所示。图 10(a)表明当左投影仪投射纯白图像, 右投影仪投射纯黑图像时(用 WB 表示)。图 10(b)、10(c)分别是阐述右投影仪投射纯白图像、左投影仪投射纯黑图像(用 BW 表示)和左投影仪投射纯黑图像、右投影仪投射纯黑图像(用 BB 表示)的两种情况。透过匹配的互补滤光片测量到纯白图像的亮度都大于 110 nit, 而纯黑图像的亮度均小于 4 nit。

3.6 显示串扰的测量和分析

立体显示设备的串扰计算由下述公式给出:

左眼:

$$\frac{I_{BW} - I_{BB}}{I_{WB} - I_{BB}}, \quad (1)$$

右眼:

表 3 各系统的色坐标

Table 3 Chromaticity coordinates of each system

	红(x, y)	绿(x, y)	蓝(x, y)	白(x, y)
Rec.2020	(0.708, 0.292)	(0.170, 0.797)	(0.131, 0.046)	(0.3127, 0.3290)
原始投影仪	(0.333, 0.216)	(0.311, 0.570)	(0.171, 0.133)	(0.2727, 0.3080)
带有 CMBF1 的投影仪	(0.330, 0.159)	(0.326, 0.608)	(0.162, 0.083)	(0.2657, 0.2706)
带有 CMBF2 的投影仪	(0.270, 0.169)	(0.187, 0.660)	(0.149, 0.102)	(0.2033, 0.2580)

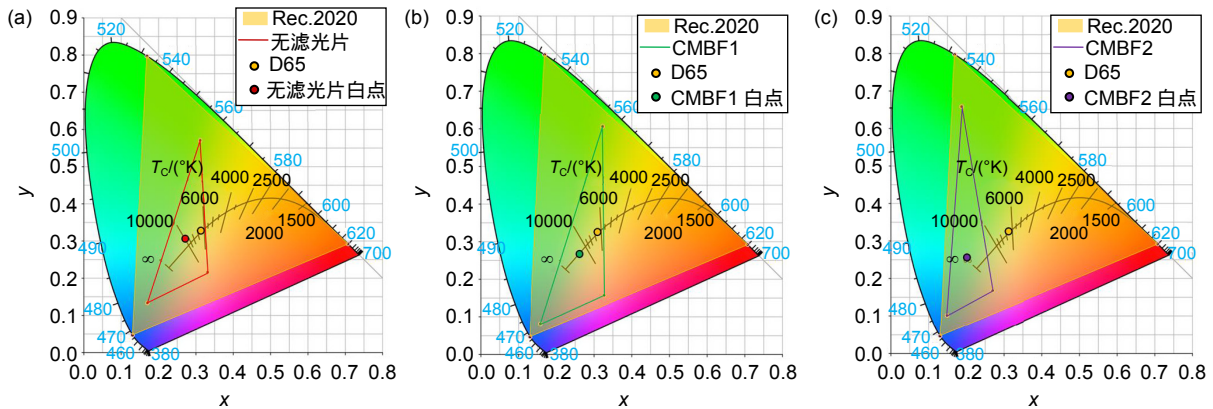


图 8 色度图。三图中的黄色部分均为 Rec.2020 标准色域；(a) 红色标记未覆盖滤光片的原始投影系统色域；(b) 绿色标记覆盖 CMBF1 的投影系统色域；(c) 紫色标记覆盖 CMBF2 的投影系统色域

Fig. 8 Chromaticity diagram. The yellow in each picture marks the colour gamut of Rec.2020. (a) The red marks the color gamut of the origin projector system, without CMBF; (b) The green marks the color gamut of the system with CMBF1; (c) The purple marks the color gamut of the system with CMBF2

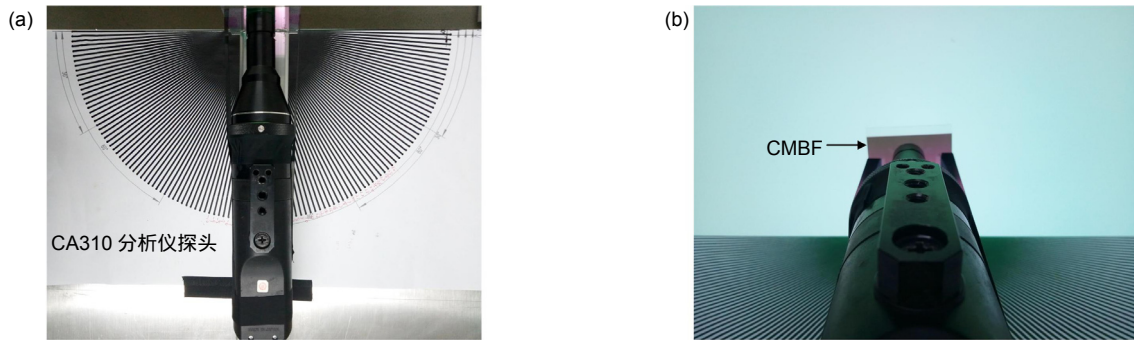


图 9 测试设备及场景的俯视图(a)与正视图(b)
Fig. 9 Top view (a) and face view (b) of the test scene

$$\frac{L_{WB} - L_{BB}}{L_{BW} - L_{BB}}, \quad (2)$$

其中： L_{WB} 表示左图为白，右图为黑时的亮度； L_{BW} 表示左图为黑，右图为白时的亮度； L_{BB} 表示左右图均为黑时的亮度。上述串扰计算需要的数据在图 10 中以柱状图形式给出。计算结果如图 11 所示。

可以发现，该谱分复用的立体显示系统左眼的串扰小于 1.9%而右眼的串扰小于 3.2%。其左右串扰的不对称是由 CMBF 结构决定的。在图 6(a)、6(b)中我们使用的是平行光测量 CMBF 的光谱图，可以看到当入射角度从 0° 变化为 15° 时，两块 CMBF 的光谱整体向左移动(即向波长更短的方向平移)。当进行串扰测试，使用投影仪投射出的光束是带有一定发散角的(约为 15°)，致使在实际使用中，两块 CMBF 的通带都向左侧发生一定的延伸，使通带变宽。而整体上由图 6(c)、6(d)可以看出 CMBF1 的通带位于 CMBF2 右侧，这样

在非平行光的情况下，CMBF2 会更多的受到来自于 CMBF1 光谱延伸带来的影响，从而 CMBF2 的串扰值要大于 CMBF1。

4 结论

根据谱分复用 3D 投影系统的相关理论，在普通的 2D 投影系统基础上，改进得到一个表现良好的 3D 投影系统。针对该系统的相关参数进行了测量评估，其中平均串扰小于 3%，符合立体显示对串扰低于 10% 的要求，具有一定的实用价值，但是仍旧不满足数字立体放映系统串扰度低于 2.5% 的要求^[12]，需要研制更合适的互补式滤光片来解决这个问题。理想的互补式滤光片应满足两个要求：其一，通带近似方波，拥有陡峭的带通边缘；其二，互补的滤光片没有通带重叠的部分。在薄膜干涉理论的指导下，将来的工作需要更多的计算机仿真和相应的验证实验获取表现更优秀

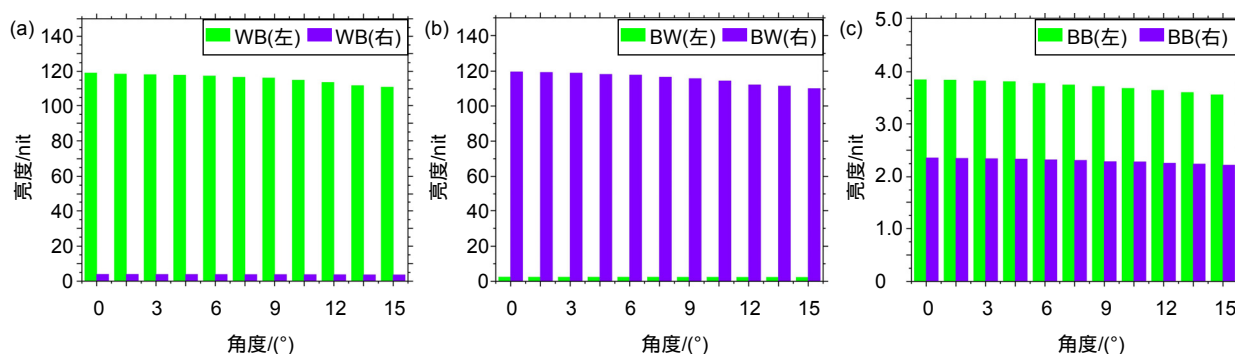


图 10 显示亮度测量。(a) 左投影仪纯白, 右投影仪纯黑亮度测量;
(b) 左投影仪纯黑、右投影仪纯白亮度测量; (c) 左投影仪纯黑、右投影仪纯黑亮度测量

Fig. 10 The measurement of the brightness. (a) Measurement in condition that the left image is white and the right image is black;
(b) Measurement in condition that the left image is black and the right image is white;
(c) Measurement in condition that the left image and the right image are black

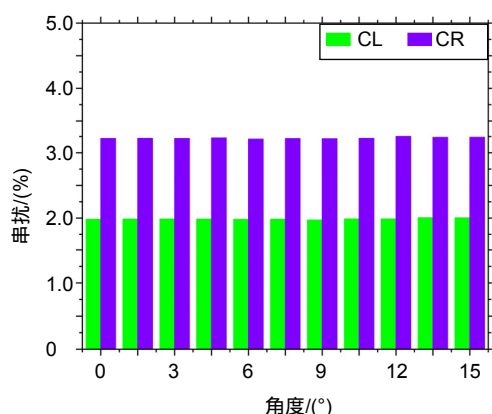


图 11 系统串扰图

Fig. 11 System crosstalk

的层叠结构。此外, 系统在亮度方面也存在一定的不足, 后期可以通过增加投影仪亮度的方式改善。而在色彩校正方面, 可通过调整两台投影仪的输入图像, 结合使用 FPGA 进行色域变化, 一定程度上可以解决色偏问题。

参考文献

[1] 马群刚, 夏军. 3D 显示技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2019: 12-47.
Ma Q G, Xia J. 3D Display Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2019: 12-47.
[2] Park M, Choi H J. A three-dimensional transparent display with enhanced transmittance and resolution using an active parallax barrier with see-through areas on an LCD Panel[J]. *Current Optics and Photonics*, 2017, 1(2): 95-100.
[3] Li C, Kang X B, Shi D X, et al. Classification and development of stereoscopic display[J]. *Electrical Technology of Intelligent*

Buildings, 2017, 11(6): 47-52.

李超, 康献斌, 时大鑫, 等. 立体显示技术的分类与进展[J]. *智能建筑电气技术*, 2017, 11(6): 47-52.

[4] Xu B, Wu Q Q, Bao Y C, et al. Time-multiplexed stereoscopic display with a quantum dot-polymer scanning backlight[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(16): 4526-4532.

[5] Li M. A brief history of stereoscopic film development[J]. *Advanced Motion Picture Technology*, 2014(7): 47-59.

李铭. 立体电影发展简史[J]. *现代电影技术*, 2014(7): 47-59.

[6] Tang R B, Zhu W Q, Chen F, et al. Design of stereoscopic video displayer based on red and blue glasses[J]. *Microcomputer & Its Applications*, 2015, 34(21): 34-36.

汤锐彬, 朱雯青, 陈芬, 等. 基于红蓝眼镜的立体视频播放器设计[J]. *微型机与应用*, 2015, 34(21): 34-36.

[7] Kuroda Y, Nishihara I, Nakata T. Image optimization method of large autostereoscopic display of dual projection types[C]//*Proc. SPIE 11049, International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT)*, 2019.

[8] 陈巍元, 陈达, 赵猛, 等. 一种用于三色激光 3D 投影的滤光装置: 207037321U[P]. 2018-02-23.

[9] Wu H, Jin H, Sun Y, et al. Evaluating stereoacuity with 3D shutter glasses technology[J]. *BMC Ophthalmology*, 2016, 16(1): 45.

[10] Li Y. Research and simulation of performance parameters of polarized stereoscopic projection system[J]. *Journal of Jialing University*, 2014, 32(5): 36-39.

李艳. 偏振式立体投影系统性能参数研究与仿真[J]. *嘉应学院学报*, 2014, 32(5): 36-39.

[11] Su Y J. Microcrystalline silicon thin films deposited by ICP assistant magnetron sputtering[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.

苏元军. ICP 辅助磁控溅射制备多晶硅薄膜[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.

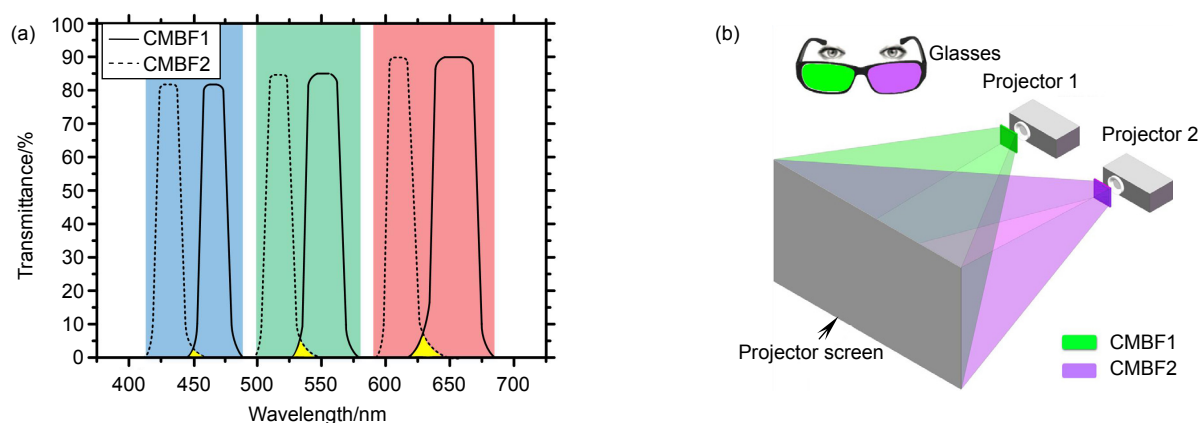
[12] Definition of terms in technical requirements and measurement methods for stereoscopic projection of digital cinema[J]. *Advanced Motion Picture Technology*, 2015(2): 52.

《数字影院立体放映技术要求和测量方法》术语定义[J]. *现代电影技术*, 2015(2): 52.

A 3D projection system based on complementary multiband bandpass filter

Qi Liyang, Xu Bin, Wang Yuanqin*

Stereo Image Technology Lab, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210046, China



The principle of spectrum-multiplex 3D display. (a) The spectrogram of CMBF; (b) The principle diagram of 3D projector

Overview: A 3D projection system based on complementary multiband bandpass filter (CMBF) is proposed in this paper, which enables viewers to gain 3D experience through special glasses. Different from the time-multiplex or the spatial-multiplex system, it is a spectrum-multiplex system using pairs of CMBFs. The three pairs of complementary bandpass of a pair of CMBFs can be designed to cover the three spectrum ranges of RGB individually and in each pair the two bandpass nearly do not overlap. By using the CMBFs, the images from left and right projectors can be divided in spectrum as well. The special glass's lens is same as the corresponding CMBFs appended to the projector. So, the left image can only be seen by the left eye through the special glasses and vice versa. In this paper, pairs of CMBFs which can meet the principle of spectrum-multiplex system are made and a whole 3D projection system is built from two ordinary projectors. This 3D projection system does not need special screen which is common in a commercial cinema. That's to say, by adding several CMBF films, common projection system can be adapted in to a 3D one. The system's spectrum, chromaticity, brightness and crosstalk are also measured in this paper. The spectrum is close to the ideal one, only having a few overlaps which will result in the crosstalk. There are some differences in the chromaticity diagrams between the two CMBFs, which will cause a little chromaticity aberration. This problem can be solved by using FPGA to adjust the input digital images to make the triangle in one chromaticity diagram almost the same as the other one. The brightness is over 110 nits when a pure white image is shown and the brightness is below 4 nits when a pure black image is shown. The left crosstalk is less than 2% and the right crosstalk is less than 3.5%. So the average crosstalk of this system is about 3%, meeting the basic requirement of crosstalk in 3D display which is commonly less than 10%. But the crosstalk of 3D projection in cinema is usually less than 2%. To meet this requirement, an improvement in CMBF's overlap must be done in the future, such as making a better pair of CMBFs without overlaps in spectrum. Besides, the brightness and color are not good enough in this system but can be improved easily for the reason that the screen in our experiment is just a wall.

Citation: Qi L Y, Xu B, Wang Y Q. A 3D projection system based on complementary multiband bandpass filter[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(7): 190334

Supported by National Key R&D Plan (2016YFB0401503) and R&D Plan of Jiangsu Science and Technology Department (BE2016173)

* E-mail: yqwang@nju.edu.cn