

# 快门眼镜式立体显示中闪烁的客观评价

夏振平 李晓华 陈磊 汤四海

(东南大学电子科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要** 为了更准确、客观地评价快门眼镜式立体显示技术中的闪烁现象,提出了一种基于时变光信号测量的闪烁程度客观评价方法。利用瞬态亮度响应测量系统实现对显示器时变亮度信号的准确记录,然后在阴极射线管(CRT)显示的临界闪烁频率(CFF)估计模型基础上,结合基于快门眼镜式立体显示的视觉感知实验,建立了快门眼镜式立体显示的闪烁程度估计模型。估计模型的估算结果与视觉感知实验结果的相关系数达到 0.97。该瞬态亮度测量系统以及提出的闪烁程度估计模型实现了对快门眼镜式立体显示闪烁程度的客观量化,同时对视觉舒适度的优化也起到了积极的推动作用。

**关键词** 视觉光学;信号处理;立体显示;闪烁;客观评价

**中图分类号** TN27 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1233001

## Objective Evaluation of Flicker in Stereoscopic Display with Active Shutter Glasses

Xia Zhenping Li Xiaohua Chen Lei Tang Sihai

(School of Electronic Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

**Abstract** To evaluate the flicker visibility of active shutter type stereoscopic display more precisely and objectively, the temporal luminance response signal measurement based flicker visibility objective evaluation method is proposed. The temporal luminance measurement system realizes the precise record of display luminance output. Based on the critical flicker frequency (CFF) model of cathode ray tube (CRT) display, the perception experiments on stereoscopic display with active shutter glasses are implemented to establish the flicker visibility objective evaluation model of stereoscopic display with active shutter glasses. The correlation coefficient between the estimation result of the proposed model and the perception result is 0.97. The temporal luminance measurement system combined with the flicker visibility estimation model realizes the objective evaluation of the flicker in stereoscopic display with active shutter glasses, and it also helps to optimize the visual comfort level of stereoscopic displays.

**Key words** visual optics; signal processing; stereoscopic display; flicker; objective evaluation

**OCIS codes** 120.1880; 330.6790; 330.7320; 350.4800

## 1 引 言

近来,越来越多的立体电视和立体显示器进入市场,由于其更为真切的临场感受以及日趋下降的价格,立体显示技术正逐渐被消费者所接受。立体显示相关研究也越来越广泛和深入<sup>[1-5]</sup>。目前,消费市场上的立体显示产品以眼镜式立体显示为主,

即空间复用的偏振式立体显示和时间复用的快门眼镜式立体显示<sup>[6]</sup>。前者由于左右视图利用不同的空间位置显示,存在空间分辨率降低的问题,无法实现全高清显示,后者由于左右视图在时间上交替显示,存在闪烁现象,引起不舒适感。

随着技术的进步,快门眼镜式立体显示的屏幕刷

**收稿日期**: 2013-05-09; **收到修改稿日期**: 2013-07-29

**基金项目**: 国家 973 计划(2010CB327705,2013CB328803)、国家 863 计划(2012AA03A302,2013AA011004)

**作者简介**: 夏振平(1985—),男,博士研究生,主要从事立体显示图像质量测量、评价和优化等方面的研究。

E-mail: xzp@seu.edu.cn

**导师简介**: 李晓华(1961—),男,博士,教授,主要从事平板显示器测量、评价和标准制定等方面的研究。

E-mail: lxh@seu.edu.cn(通信联系人)

新频率可以达到 240 Hz 以上,然而由于成本等原因,与之配合使用的快门眼镜单眼调制频率仅为 60 Hz,在显示大面积高亮画面时存在明显的闪烁感。等离子显示、扫描背光技术的应用同样存在闪烁的问题<sup>[7-8]</sup>,闪烁感的评价对其改善具有积极的指导和推动作用。Kelly 等<sup>[9-12]</sup>早期对人眼感知闪烁的原理做了深入的研究,基于这些研究成果,Farrell 等<sup>[13-14]</sup>结合大量的视觉感知实验,建立了评价阴极射线管(CRT)显示的临界闪烁频率(CFF)模型,该模型仅限于评价 CRT 显示而且不能直接估计闪烁的严重程度。视频电子标准协会(VESA)标准<sup>[15]</sup>中提出了一种基于测量光调制信号,利用前几个谐波的幅值与标准的时间对比度灵敏函数(TCSF)相乘的方法评价闪烁感,这种方法利用了除基波以外的其他高次谐波,这些高次谐波本身幅值很小,加之与之对应的灵敏度系数几乎为零,它们的使用就明显多余了,增加了评价的复杂程度。其次,这种方法使用了标准 TCSF,在特定应用中不够准确。Waston 等<sup>[16]</sup>提出了一种最小可差(JND)的闪烁评价方法,这种方法利用定义的基频亮度对比度与估算的 TCSF 相乘得出 JND 闪烁评价,这种方法过于简单,没有考虑实际应用环境,不够客观,没有主观实验基础。

本文通过瞬态亮度响应测量系统测量被测显示系统的亮度输出时序特性,基于 Farrell 的 CRT 临界闪烁频率估算模型,结合视觉感知实验,建立了快门眼镜式立体显示闪烁程度的客观评价方法。

## 2 快门眼镜式立体显示

快门眼镜式立体显示的基本原理是通过液晶快门眼镜左右镜片的交替开关与显示器时序显示立体图像的左右视图同步工作,使人的左右眼分别交替看到具有视差的左右图像,形成立体效果。图 1 是快门眼镜式立体显示的基本原理图,当单眼图像以 60 Hz 的频率闪烁时,显示器的驱动频率必须达到 120 Hz,然而由于数据扫描占据大部分时间所导致的驱动不够,以及液晶的慢响应等问题,120 Hz 扫描的快门眼镜式立体显示技术存在严重的串扰现象,影响立体感知效果以及视觉舒适度<sup>[17]</sup>。240 Hz 液晶扫描技术<sup>[18-19]</sup>和背光调制技术的出现解决了这一问题,数据扫描在一半时间内就可以完成,数据扫描的同时,背景光是关闭的,等整个视图完全扫描好后打开背景光,这种方法大大降低了串扰现象<sup>[20]</sup>。然而,快门眼镜仍以 60 Hz 的频率工作,人眼接受到的光信号为 60 Hz,在显示大面积高亮图

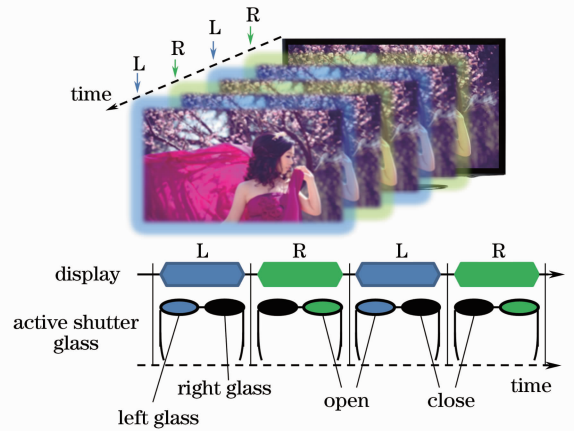


图 1 快门眼镜式立体显示技术

像时会有明显闪烁感,同时扫描背光的应用及其与快门眼镜的同步方式对闪烁感有显著影响。

## 3 时变光信号测量分析

### 3.1 测量系统

瞬态亮度响应测量系统用于测量和记录显示系统光信号随时间变化的规律,其结构如图 2 所示, LVDS 表示低电压差分信号, DVI 表示数字显示接口。系统主要由可编程信号发生器、光电转换模块、亮度校正模块、数据采集模块和主控计算机等几个部分组成。可编程信号发生器与计算机连接,用以控制显示器显示所需的测试图像,光电二极管记录显示系统光信号的变化,变化信号经过放大器的放大和滤波去噪处理后输入到数据采集模块,信号发生器向显示器输出显示信号的同时向数据采集模块发出触发信号,实现图像显示和亮度信号采集的同步。亮度计记录显示器的亮度值,与数据采集模块采集的电压值对比后,可以建立电压与亮度之间的对应关系,将电压信号转化为亮度信号。

测量探头是数据采集的关键部分,它主要由光电二极管及低噪声信号放大器组成。光电二极管的选择要求满足高速响应,同时其感光灵敏度函数必须符合人眼的视见函数。测量系统中选用的光电二极管是 Hamamatsu<sup>TM</sup>公司生产的 S9219-01,其响应速度用上升时间来表示,上升时间为 0.5  $\mu\text{s}$ ,足以保证对常用的液晶显示器(LCD)、等离子显示器(PDP)等显示系统光亮度变化的准确记录。S9219-01 的光谱响应与人眼极为相似,其敏感光谱范围在 380~780 nm 之间,光敏峰值波长在 555 nm,感光灵敏度函数与标准人眼视见函数的偏差最大不超过 10%。由于光电二极管产生的电流信号极其微弱,

所以必须将电流信号转换为电压信号,并进行等比例的信号放大和滤波。信号放大器应满足测试电路总带宽、信噪比等基本要求,同时在保证光电转换线性度的情况下尽可能地提高输出的电压信号。测量系统中选择了 Analog Device 公司生产的 OP27 作为运算放大器,该放大器的性能满足测量的要求,为测量的可靠性提供了坚实的保障。

### 3.2 测量结果分析

观看快门眼镜式立体显示内容时,显示器发出

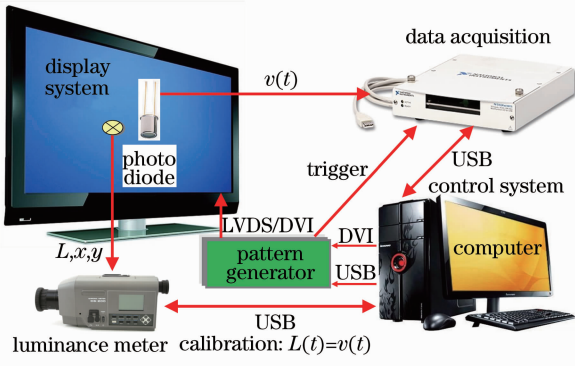


图 2 测量系统结构示意图

Fig. 2 Diagram of measurement system structure

的光透过快门眼镜进入人眼引起闪烁,所以分析和评价闪烁感时的光信号测量也由测量系统透过快门眼镜测量,测量设置如图 3 所示,测量探头正对左或右眼镜片的中心位置,测量探头、快门眼镜和显示器尽量贴近放置。设置测量系统的采样率在 10 kHz 以上。

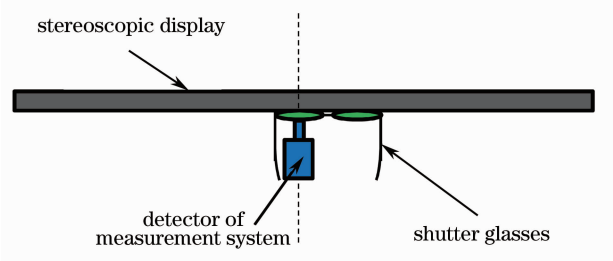


图 3 测量设置俯视图

Fig. 3 Top view of measurement setup

显示器显示恒定白场时,利用测量系统测得透过快门眼镜光信号随时间的变化,归一化后的光强时序如图 4(a)所示,可以看出该光信号是周期变化信号,而任何满足狄里赫利条件的周期信号都可以表示为直流分量和多个简谐分量的和:

$$L = L_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{2}{T} \int_0^T \sin\left(n \frac{2\pi}{T} t\right) f(t) dt \sin\left(n \frac{2\pi}{T} t\right) \right] + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{2}{T} \int_0^T \cos\left(n \frac{2\pi}{T} t\right) f(t) dt \cos\left(n \frac{2\pi}{T} t\right) \right], \quad (1)$$

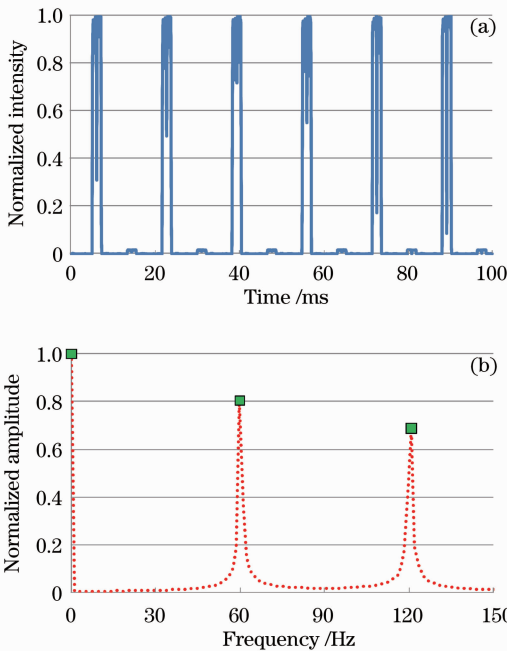


图 4 时变光信号测量结果。(a)时域图;(b)频域图

Fig. 4 Measurement results of modulated light. (a) Time domain; (b) frequency domain

式中  $L_0$  为亮度平均值,  $T$  为信号的周期。时域周期信号经过傅里叶变换后,得到该信号在频域上对应频率的幅度值,其中频率为零时对应直流分量,也就是亮度平均值,图 4(b)为归一化的信号频域图,直流分量强度为 1,基频为 60 Hz。

## 4 闪烁程度估算模型

基于 Kelly 的研究成果, Farrell 以视觉感知实验为基础,建立了经典的 CRT 临界闪烁频率模型。该模型建立在 CRT 发光特性的基础上,并融合了基于 CRT 的实验结果,因此在快门眼镜式立体显示闪烁感的评价上并不能直接适用,而且该模型也不能对闪烁程度做出直接评价。

### 4.1 视觉感知实验

为了建立符合快门眼镜式立体显示发光特性的闪烁程度评价模型,基于 55 inch (1 inch = 2.54 cm) 快门眼镜式立体显示器设计完成了两组视觉感知实验。

第一组实验利用阶梯法<sup>[21]</sup>确定闪烁亮度阈值,

通过观察闪烁程度,反复调节显示亮度的方法确定闪烁亮度阈值。第二组实验通过对四种灰度(94、130、183、255)分别以四种大小(0.125、0.25、0.5、1倍屏幕面积)方式显示,以ITU-RBT.500标准<sup>[22]</sup>中5分制的形式对闪烁程度进行评分,如表1所示。两组实验均采用暗室环境,3倍屏高的全高清显示屏标准视距,实验环境温度为24℃,相对湿度为62%。共有16人参加了实验,男女人数比例为1:1,年龄范围在23~36周岁之间,平均年龄25.3周岁,所有受测者的双眼视力(或矫正后视力)均达到1.0以上。

表1 主观视觉感知评分标准

Table 1 Perception experimental grading standard

Grade	Flicker visibility
5	Invisible
4	Slightly visible
3	Moderate visible
2	Obviously visible
1	Very obviously visible

#### 4.2 建立模型

Farrell临界闪烁频率模型建立在CRT发光特性的基础上,所以通过以上第一组实验的结果,对Farrell模型中能量幅度的定义进行了修正,使其符合快门眼镜式立体显示的显示特性。第二组实验的结果经过归一化、反转等处理后,通过曲线拟合的方法建立了符合快门眼镜式立体显示特性的闪烁程度客观评价模型,可表示为

$$I_{FVL} = \frac{2}{\pi} \arctan(0.5701E_{rel} + 0.04641E_{rel}^2), \quad (2)$$

式中 $I_{FVL}$ 为闪烁程度指标(FVLI), $E_{rel}$ 为相对能量幅度,是实际能量幅度 $E_{obs}$ 与对应阈值能量幅度 $E_{pre}$ 的比值之和,可表示为

$$E_{rel} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{E_{obs}(f_i)}{E_{pre}(f_i)}, \quad (3)$$

式中

$$\begin{cases} E_{obs}(f) = R_{d.c.} \times 3.4241A_{mp}(f) \\ R_{d.c.} = L_d \cdot A \\ A = \pi(d/2)^2 \\ d = 5 - 3 \cdot \tanh[0.4 \lg(3.183L_d)] \end{cases}, \quad (4)$$

其中 $R_{d.c.}$ 为视网膜照度的平均值,是瞳孔面积 $A$ 与显示平均亮度 $L_d$ 的乘积,瞳孔的直径 $d$ 也与显示亮度 $L_d$ 直接相关。 $A_{mp}(f)$ 是图4(b)对应频率的归一化幅值,实际计算中只用到基频60Hz的对应值,其他更高次谐波对闪烁感已无影响。参数3.4241是根据第一组实验结果计算得到的幅值修正值。

(3)式中阈值能量幅度 $E_{pre}$ 的公式可表示为

$$E_{pre}(f) = a \exp(bf), \quad (5)$$

式中参数 $a$ 、 $b$ 与视觉张角有关<sup>[14]</sup>,具体数值通过插值得到,如3倍屏高观测距离,全屏显示图像时对应的 $a=0.2080$ , $b=0.1171$ 。

由(2)式的闪烁程度指标可以简单、明确地评价快门眼镜式立体显示系统的闪烁程度,该模型的估算值与视觉感知结果的拟合相关系数为0.97。图5表示了提出的闪烁程度指标随着相对能量幅度的变化情况,实线为模型估算值,散点为处理后的视觉感知实验结果。

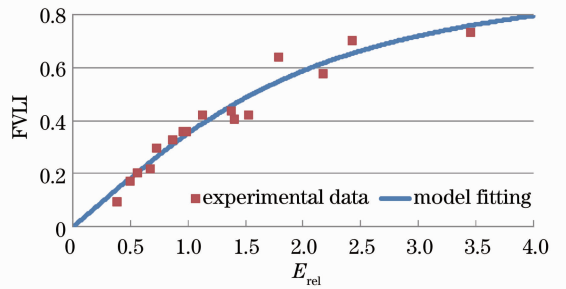


图5 闪烁程度指标随着相对能量幅度的变化

Fig. 5 Flicker visibility level index versus relative energy amplitude

#### 4.3 讨论

提出的闪烁程度评价模型基于快门眼镜式立体显示的视觉感知实验,实验选择屏幕亮度分布均匀的灰度图像作为闪烁感测试目标,而实际观察的自然图像在整个屏幕上的亮度分布并不均匀,模型对自然图像闪烁程度的预测结果可能与实际观察结果存在一定差异。文中两次主观实验均在暗室中进行,而环境光可能对显示系统的闪烁感有影响。同时,采用前后两层偏振膜的快门眼镜对环境光同样存在调制作用,特别当环境光本身以一定频率闪烁时,两种调制的叠加有可能产生更严重的闪烁感。以上这些将在后续的研究中涉及。

### 5 结 论

针对快门眼镜式立体显示的闪烁现象,提出了一种基于时变光信号测量的闪烁程度客观评价方法。该方法利用高采样率瞬态亮度响应测量系统对显示系统的亮度输出信号进行实时记录,时域信号进行傅里叶变换后的频域信息用于模型中闪烁程度的计算。通过两组基于快门眼镜式立体显示的视觉感知实验对Farrell的CRT临界闪烁频率模型进行了改进,建立了符合快门眼镜式立体显示发光特性

的闪烁程度估计模型。估计模型的估算结果与视觉感知实验结果的拟合相关系数达到 0.97。该瞬态亮度测量系统以及提出的闪烁程度估计模型实现了对快门眼镜式立体显示闪烁程度简单、明确的客观量化,量化结果与主观视觉感知实验结果吻合,对快门眼镜式立体显示闪烁程度评价以及视觉舒适度优化起到了积极的推动作用。

**致谢** 感谢深圳市华星光电技术有限公司对本文的赞助。

### 参 考 文 献

- 1 Song Zhendong, Jiang Wei. Monocular multi-viewpoints stereo imaging and application [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0515001.  
宋振东, 姜 伟. 单目多视点立体图像提取及应用 [J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0515001.
- 2 Dai Zhihua, Xu Yuping, Bu Jing, *et al.*. Light field microscope to achieve three-dimensional real-time naked-eye display [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1022005.  
戴志华, 徐于萍, 步 敬等. 光场显微镜实现裸眼三维实时显示 [J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1022005.
- 3 Zhang Shuo, Wang Jie, Wang Jincheng, *et al.*. Simple calculation method for three-dimensional imaging based on compressed sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0111004.  
张 硕, 王 杰, 王金成, 等. 基于压缩感知的三维物体成像的简单计算方法 [J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0111004.
- 4 Jiao Xiaoxue, Zhao Xing, Yang Yong, *et al.*. Elemental images correction of camera array pick-up for three-dimensional integral imaging [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(3): 0309001.  
焦小雪, 赵 星, 杨 勇, 等. 基于三维集成成像相机阵列获取的元素图像校正 [J]. *中国激光*, 2012, 39(3): 0309001.
- 5 Cao Zisheng, Li Haifeng, Yao Zhenning, *et al.*. Simulation and crosstalk analysis of 360° three-dimensional display system based on rotating LED line array [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(5): 0508001.  
曹子盛, 李海峰, 姚振宁, 等. 基于旋转 LED 线阵列全景三维显示系统的模拟及串扰分析 [J]. *中国激光*, 2012, 39(5): 0508001.
- 6 D Suzuki, T Fukami, E Higano, *et al.*. Crosstalk-free 3D display with time-sequential OCB LCD [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2009, 40(1): 428-431.
- 7 Zhang Yuning, Lei Wei, Li Xiaohua, *et al.*. Objective evaluation of large area flicker for plasma displays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(12): 2184-2188.  
张宇宁, 雷 威, 李晓华, 等. 等离子体显示大面积闪烁的客观评价 [J]. *光学学报*, 2007, 27(12): 2184-2188.
- 8 Lili Wang, Kees Teunissen, Yan Tu, *et al.*. Flicker visibility in scanning-backlight displays [J]. *J Society for Information Display*, 2008, 16(2): 375-381.
- 9 D H Kelly. Diffusion model of linear flicker responses [J]. *J Opt Soc Am*, 1969, 59(12): 1665-1670.
- 10 D H Kelly. Theory of flicker and transient response, I. Uniform fields [J]. *J Opt Soc Am*, 1971, 61(4): 537-546.
- 11 D H Kelly. Theory of flicker and transient response, II. Counterphase gratings [J]. *J Opt Soc Am*, 1971, 61(5): 632-640.
- 12 D H Kelly, R E Savoie. Theory of flicker and transient response, III. An essential nonlinearity [J]. *J Opt Soc Am*, 1977, 68(11): 1481-1490.
- 13 J E Farrell. An analytical method for predicting perceived flicker [J]. *Behaviour and Information Technology*, 1986, 5(4): 349-358.
- 14 J E Farrell, B L Benson, C R Haynie. Predicting flicker thresholds for video display terminals [J]. *Proc SID*, 1987, 28(4): 449-453.
- 15 Video Electronics Standards Association. Flat Panel Display Measurements Standard [S]. Version 2. 0, Milpitas: Video Electronics Standards Association, [2005-05-19].
- 16 A B Watson, A J Ahumada. Flicker visibility: a perceptual metric for display flicker [J]. *SID Digest of Technical Papers*, 2011, 42(1): 957-959.
- 17 L Meesters, W I Jsselsteijn, P Seuntjens. A survey of perceptual evaluations and requirements of three-dimensional TV [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2004, 14(3): 381-391.
- 18 S S Kim, B H You, H Choi, *et al.*. World's first 240 Hz TFT-LCD technology for full-HD LCD-TV and its application to 3D display [J]. *SID Digest of Technical Papers*, 2009, 40(1): 424-427.
- 19 D S Kim, S M Park, J H Jung, *et al.*. New 240 Hz driving method for full HD & high quality 3D LCD TV [J]. *SID Digest of Technical Papers*, 2010, 41(1): 762-765.
- 20 D S Kim, Y J Ko, S M Park, *et al.*. Stereoscopic display technologies for FHD 3D LCD TV [C]. *SPIE*, 2010, 7690: 769008.
- 21 S Tourancheau, P L Callet, D Barba. Influence of motion on contrast perception: supra-threshold spatio-velocity CSF measurements [C]. *SPIE*, 2007, 6492: 64921M.
- 22 International Telecommunications Union, Rec. Methodology for the Subjective Assessment of the Quality of Television Pictures [OL]. [http://vision.poly.edu/yanfu/welcom\\_Yen-Fu\\_Ou-homepage/QA\\_Data\\_files/ITU-R\\_BT\\_500-11.pdf](http://vision.poly.edu/yanfu/welcom_Yen-Fu_Ou-homepage/QA_Data_files/ITU-R_BT_500-11.pdf). [2013-08-22].

栏目编辑: 何卓铭