

文章编号:1007-2780(2016)10-0989-09

面向 UHDTV 的多分辨率视频显示质量评估研究

赵 娜*, 宋佳润, 邹文杰

(西安电子科技大学 综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要:超高清电视(UHDTV, Ultra High Definition TV)凭借其超高的屏幕分辨率可以更细腻地展现视频的内容,受到越来越多用户的青睐,然而目前超高清节目源发展有限,通常只能将低于超高清电视屏幕分辨率的视频经过插值后播放,这样处理可能会对用户主观体验带来一定的影响。如何准确评估 UHDTV 多分辨率视频源对视频显示质量的影响,对 UHDTV 业务的部署和优化起到指导性的作用。本文通过主观实验,利用 SSIM 算法预测视频源编码质量,并进一步分析视频源分辨率对 UHDTV 视频显示质量的影响,提出一种面向 UHDTV 的视频显示质量评估模型。实验结果表明,相比 SSIM、VIFp 和 MOVIE 三种经典的视频质量评估算法,本文模型所得视频显示质量和主观质量之间的皮尔森系数分别提高 1.13%、1.89% 和 2.31%,斯皮尔曼等级相关系数分别提高 1.35%、1.53% 和 2.24%,RMSE 降低 35.05%、36.94% 和 39.71%。所提模型可以更加准确地评价 UHDTV 视频显示质量。

关 键 词:超高清电视;视频显示质量;视频分辨率;用户体验

中图分类号:TN919.81 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20163110.0989

Evaluation of display quality on UHDTV for multi-resolution videos

ZHAO Na*, SONG Jia-run, ZOU Wen-jie

(State Key Lab. of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Ultra High Definition Television (UHDTV) has been gaining popularity with its ultrahigh screen definition. However, the lack of Ultra HD resources usually leads to the result that the videos played on UHDTV are up-scaled, which may affect the display quality of the videos. Until now, there are few researches on UHDTV video display quality. In this paper, the SSIM algorithm is employed to evaluate the video coding quality, then the effects of video resolution on display quality are analyzed according to the results of the subjective experiment, and finally a video quality assessment model is proposed for UHDTV service. Experimental results and comparisons with the classic SSIM, VIFp and MOVIE metrics show that the proposed model gets increments of 1.13%, 1.89% and 2.31% in PCC, increments of 1.35%, 1.53% and 2.24% in SRCC, and decrements of 35.05%, 36.94% and 39.71% in RMSE, respectively. Thus, the proposed model can be used to estimate the video display quality on

收稿日期:2016-05-27;修订日期:2016-07-19.

基金项目:国家自然科学基金项目(No.61371089);中国博士后基金(No.30101166332)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No.61371089);China Postdoctoral Science Foundation(No.301011663327)

* 通信联系人, E-mail: nzhaon_14@stu.xidian.edu.cn

UHDTV more accurately.

Key words: ultra high definition television; video display quality; video resolution; experience of end user

1 引言

超高清电视技术的概念自提出以来就受到了业界的青睐。UHDTV 具有高达 $3\,840 \times 2\,160$ (UHD, Ultra High Definition) 的屏幕显示分辨率, 55 英寸 (1 in = 2.54 cm) 以上的屏幕尺寸, 更广的观看角度和立体的音响系统等特点, 这些特点使得用户在用 UHDTV 观看视频时有身临其境的感受。近年来随着各大品牌电视厂商相继向市场推出 UHDTV, UHDTV 逐渐受到越来越多消费者的关注。然而, 相较于 UHDTV 的快速发展, UHD 分辨率节目源的发展却表现得有些缓慢。目前大量的电视节目依然还是标清 (SD, Standard Definition)、高清 (HD, High Definition) 或者全高清 (FHD, Full High Definition) 视频源。这些低于屏幕分辨率的视频在 UHDTV 播放时需要经过插值处理^[1-2], 但这种处理会降低视频源的清晰度, 从而对用户的观看体验造成影响。如何准确评价 UHDTV 视频的显示质量并以此为依据为 UHDTV 用户提供优质的服务质量保障是视频内容提供商和网络运营商共同需要解决的重要问题。

目前, 已有大量的视频质量评估算法主要用于评估经过压缩和传输后的视频质量失真, 如 PSNR (Peak Signal to Noise Ratio), SSIM (Structural Similarity Index Measure)^[3] 和 VQM (Video Quality Metric)^[4] 等。但对于 UHDTV 业务而言, 除了压缩失真和传输失真, 视频源的分辨率也是影响其质量的重要因素, 特别是在当前视频源分辨率无法匹配设备分辨率的情况下, 这种影响会更为明显^[5-8]。而近年来对视频显示质量的研究, 主要针对智能手机、平板电脑、笔记本电脑或者高清电视 (HDTV, High Definition TV) 等显示设备^[5-8], 尚未有针对 UHDTV 视频显示质量的相关研究。面对飞速发展的 UHDTV 业务, 建立准确有效的视频显示质量客观评估模型迫在眉睫。

本文针对 UHDTV, 使用多种分辨率的视频

进行主观测试, 根据测试结果研究视频分辨率和视频编码质量对视频显示质量的影响, 并结合二者建立视频显示质量评估模型。实验结果表明本文所提模型能够有效反映视频源和设备分辨率对视频显示质量的影响, 其性能明显优于 SSIM、VIFp 和 MOVIE 三种经典视频质量评估算法。

2 多种分辨率视频的 UHDTV 主观实验设计

2.1 测试序列

本文选择目前电视信号常用的 SD (720×480)、HD ($1\,280 \times 720$)、FHD ($1\,920 \times 1\,080$) 和 UHD ($3\,840 \times 2\,160$) 4 种分辨率作为测试视频分辨率。原始视频序列采用的是 4 个 UHD 分辨率的标准测试视频 New York、Bridge、Bike、Time Lapse, 4 个序列的画面截图如图 1 所示。每段视频序列时长为 10 s, 表 1 总结了序列在时、空间复杂度和场景内容等方面的特点。首先使用 FFmpeg 软件将原始序列分别下采样为 SD、HD 和 FHD 三种分辨率的视频序列。进而使用 x264 编码器, 分别以 6 种不同的 QP 对这 4 种分辨率的序列进行编码, 详细编码参数设置如表 2 所示。本文选用不同的编码 QP 来确保编码后的视频质量等级具有较大差异。总计获得 $112(4 \times 7 \times 4)$ 个测试序列。

表 1 原始视频序列内容及特点

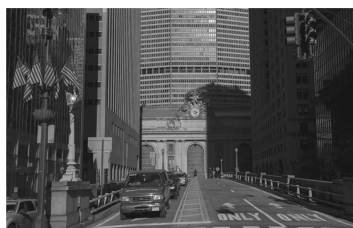
Tab.1 Contents and features of the source videos

序列名称	序列内容	主要特征
New York	十字路口的车流和人流	运动快, 画面纹理较复杂
Bridge	城市中的桥, 桥下的水 随风起波纹	运动较慢, 画面纹理简单
Bike	运动员在野外骑自行车	运动较快, 画面纹理适中
Time Lapse	树、山、蓝天、白云的拍 摄场景	运动适中, 画面纹理复杂

表 2 测试视频编码参数

Tab.2 Coding parameters of the test sequences

参数名称	参数设置
分辨率	720×480,1280×720,1920×1080,3840×2160
QP	20,30,35,40,45,50
帧率	30



(a)测试序列 New York 画面

(a)Picture of the test sequence New York



(b)测试序列 Bridge 画面

(b)Picture of the test sequence Bridge



(c)测试序列 Bike 画面

(c)Picture of the test sequence Bike



(d)测试序列 Time Lapse 画面

(d)Picture of the test sequence Time Lapse

图 1 测试序列画面

Fig.1 Pictures of test sequences

2.2 主观测试环境及设备

此次主观测试在符合 ITU-T P.913^[9] 规定的实验室环境中进行,室内为白色、无反光的墙壁,光照设备为日光灯。室内设置壁挂式 65 英寸、分辨率为 3 840×2 160 的 LED-UHDTV,沙发位于电视正面 350 cm 处,测试者的观看距离为 4 倍视频显示高度,约为 334 cm,观看角度不大于 20°。

2.3 主观测试及数据筛选

主观测试采用 ITU-T P.913 建议的 ACR (Absolute Category Rating)^[9] 9 分制评分方法进行测试,测试时在每张主观测试评分表格上都会标明如表 3 所示的评分等级说明。

此次主观测试共招募到 25 位非专家测试人员,其中 13 位男性,12 位女性,年龄在 21 至 26 岁之间,平均年龄为 24 岁,所有测试者均具有正常的视力。

为了避免长时间的测试导致测试者疲劳,影响实验结果,将测试视频序列按照不同视频分辨率分为 4 组(SD、HD、FHD、UHD),每组序列分别进行测试,各测试时长不超过 30 min。测试前,向测试者说明主观测试的时长、评分等级、评分方法以及观看距离和注意事项等内容,并给测试者播放一段样例序列,使其对测试的视频内容、质量等级和分辨率有初步的感受。测试时,每组测试序列将提供 5 种可选的随机播放顺序,每位测试者选择一种播放顺序并对每条视频的显示质量进行评价,总计获得 2 400 个评分样本。

表 3 9 分制评分方法

Tab.3 Method of 9-level rating scale

评分等级	视频主观评价	视频观看体验
9	完美	视频画面细节清晰,观看体验最好
8	非常好	介于 7 分和 9 分之间
7	好	视频画面细节可分辨,观看体验好
6	较好	介于 5 分和 7 分之间
5	一般	视频画面细节模糊,但总体能接受
4	较差	介于 3 分和 5 分之间
3	差	视频画面细节不可分辨,不能接受
2	很差	介于 1 分和 3 分之间
1	非常差	视频画面整体非常模糊,无法观看

根据上述实验,初步获得 112 条序列的平均主观分值 MOS(Mean Opinion Score)^[10]。再通过计算每个测试者的评分结果和 MOS 之间的皮尔森相关系数(PCC, Pearson linear Correlation Coefficient)排除掉 3 位 PCC 低于 0.85 的测试者的评分结果,计算出剩余的 22 位有效测试人员的主观 MOS,即得到最终主观评估的 UHDTV 视频显示质量。

3 联合编码失真和视频分辨率的视频显示质量评估

3.1 主观测试结果分析

考虑到编码失真的影响,将所有主观评估的视频显示质量 MOS 依据编码的 QP 值(QP=20, 30, 35, 40, 45, 50)分为 6 组,每组内的视频序列具有多种视频分辨率(SD, HD, FHD, UHD)。本文统一使用视频垂直方向的像素点数表示分辨率,记为 H ,例如分辨率 3840×2160 的 H 为 2160。6 组视频序列的 MOS 和 H 之间的散点图如图 2 所示。从图 2 可以看出,相同编码 QP,随着分辨率的增大,视频质量逐渐增大;相同分辨率 H ,QP 越大,视频显示质量越差。

由图 2 的结果可以发现,主观视频显示质量 MOS 同时受到编码失真和视频分辨率的影响。当 QP 小于或等于 30 时,4 个分辨率视频的主观质量绝大部分都保持在 7 分以上,且不同的分辨率之间主观质量差别相对较小,例如 QP 为 20 和 30 时,HD 分辨率视频的 MOS 与 UHD 分辨率视频的 MOS 均值分别为 8.38 和 8.18 以及 8.45 和 8.20,均值的差值分别仅为 0.07 和 0.02;当 QP 大于 30 时,主观质量随着 QP 的不同而变化较大,且每个 QP 主观质量随着分辨率的增大呈现不同程度的增大。这些现象表明,一方面,当服务商提供的电视信号达不到 UHD 分辨率时,若要使用户在 UHDTV 下获得高质量的观看体验,编码 QP 设置不应大于 30,而对于 UHD 分辨率的电视信号,则可以适当的增大编码 QP,降低传输码率,缓解传输负担;另一方面,当编码 QP 不大于 30 时,可以用 HD 分辨率的视频代替 UHD 分辨率的视频,当编码 QP 大于 30 时,视频的显示质量随着分辨率的变化而较为明显。

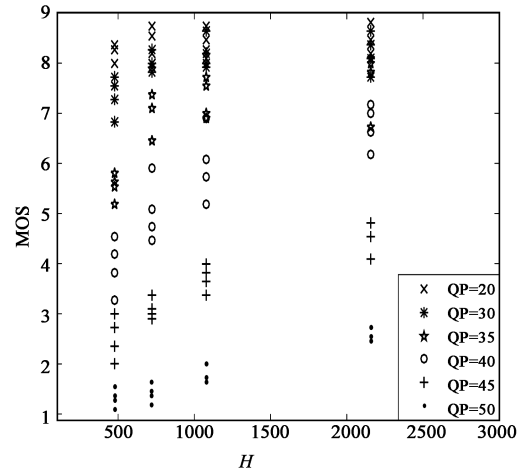


图 2 视频分辨率对主观显示质量的影响

Fig.2 Impact of video resolution on display quality

然而采用相同分辨率和编码 QP 的测试序列的 MOS 分布较为分散,例如,当 QP 为 40 时(图 1 中圈型表示的样本点),分辨率为 HD 的各个序列的 MOS 分值的范围为(5.18~6.91),分辨率为 FHD 的各序列的 MOS 分值的范围为(6.18~7.18)。这说明当分辨率相同时,直接使用视频的编码 QP 并不能准确地反映视频的主观质量,因此,有必要使用一个能够更加准确反映视频质量的参数来代替编码 QP 对视频显示质量的影响。

SSIM 算法利用原始视频帧和失真视频帧对应像素的某一邻域范围内的相似度来评估视频质量,文献[11]对比多种编码失真方法,发现基于 SSIM 算法的评估方法能够更准确地预测视频的失真。因此,本文使用 SSIM 算法的评估结果作为测试视频的编码质量 Q_c ,即有:

$$Q_c = SSIM =$$

$$[l(x, y)]^\alpha [c(x, y)]^\beta [s(x, y)]^\gamma, \quad (1)$$

式中: α, β, γ 分别为常数, x, y 分别表示原始视频信号和编码失真后视频信号,其中:

$$l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1}, \quad (2)$$

$$c(x, y) = \frac{2\delta_x\delta_y + C_2}{\delta_x^2 + \delta_y^2 + C_2}, \quad (3)$$

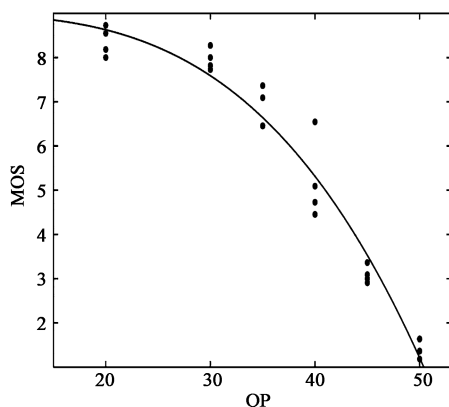
$$s(x, y) = \frac{\delta_{xy} + C_3}{\delta_x\delta_y + C_3}, \quad (4)$$

式中: μ_x, μ_y 为视频帧信息的均值, δ_x, δ_y 为视频帧信息的标准差, δ_{xy} 为原始视频与编码后视频信息的协方差, C_1, C_2, C_3 用来增加计算结果的稳定

性。由于考虑到了像素域的信息,SSIM 算法能够更加准确的预测编码失真。

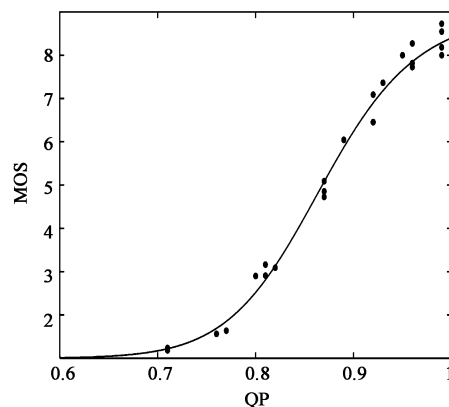
图 3(a)、(b)、(c)、(d)分别展示了 $1\,280 \times 720$ 和 $1\,920 \times 1\,080$ 分辨率视频的主观质量与视频编码 QP 和编码质量 Q_c 之间的散点图。可以看出,MOS 和 QP 的散点图分布较分散,而 MOS 和 Q_c 的散点图则分布相对较集中,分别对 MOS

与 QP 和 MOS 与 Q_c 之间的关系进行拟合,结果如图 3 所示,计算两种拟合结果得到的残差平方和 SSE(Sum of Squares for Error),图 3(a)和 (b)中, $SSE_{QP} = 6.03$, $SSE_{Q_c} = 2.15$,SSE 降低 64%;图 2(c)和 (d)中, $SSE_{QP} = 4.46$, $SSE_{Q_c} = 2.53$,SSE 降低 46%。说明编码质量 Q_c 比编码 QP 能更加准确的反映视频质量。



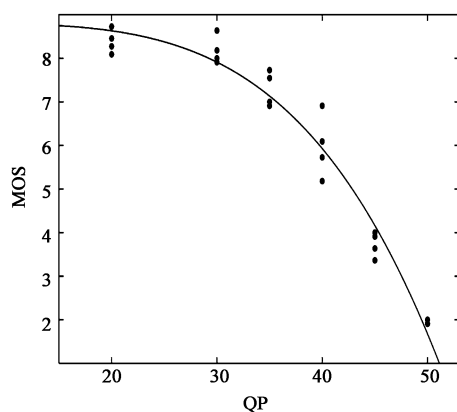
(a) $1\,280 \times 720$ 分辨率 MOS 与 QP 之间的散点图

(a) Features between MOS and QP with $1\,280 \times 720$



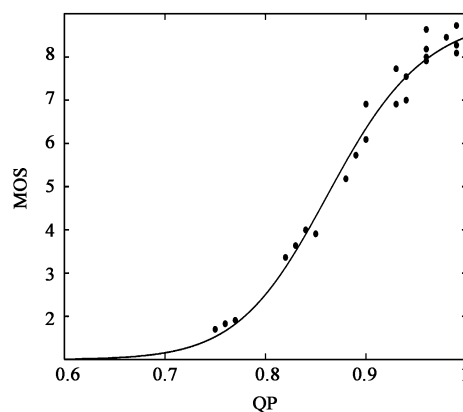
(b) $1\,280 \times 720$ 分辨率 MOS 与 Q_c 之间的散点图

(b) Features between MOS and Q_c with $1\,280 \times 720$



(c) $1\,920 \times 1\,080$ 分辨率 MOS 与 QP 之间的散点图

(c) Features between Mos and Op with $1\,920 \times 1\,080$



(d) $1\,920 \times 1\,080$ 分辨率 MOS 与 Q_c 之间的散点图

(d) Features between MOS and Q_c with $1\,920 \times 1\,080$

图 3 QP 和 Q_c 与主观质量之间的散点图

Fig.3 Features between MOS and QP or Q_c

3.2 UHDTV 视频显示质量评估模型

图 4 是四种不同分辨率主观视频显示质量 MOS 和 Q_c 的关系图,这里列举了序列 New York 和 Bridge 的测试结果。从图 4 可以看出,同一视频分辨率,MOS 随着 Q_c 的增加而增大,主观质量

与编码质量 Q_c 之间有很强的相关性,由前面的分析及图 3 的对比可知,使用编码质量 Q_c 代替编码 QP 之后,图 4 中点的分布更加集中。另外,不同的视频分辨率,主观质量随视频编码质量增长的程度也不同,例如图 4, 720×480 序列的 MOS 值

随 Q_c 的增长程度要低于 $3\,840\times 2\,160$ 序列的增长程度,这说明除了编码质量 Q_c ,主观质量同时还会受到视频分辨率的影响。

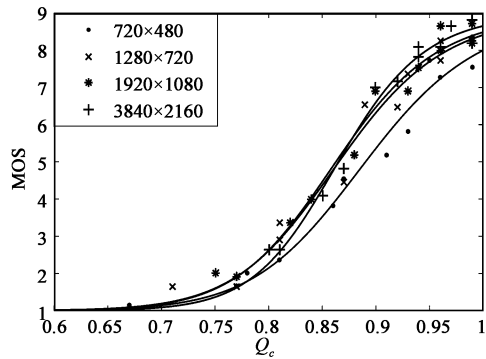


图 4 编码质量与主观质量之间的关系
Fig.4 Relationship between MOS and coding quality

观察图 4 中各分辨率视频的主观质量 MOS 与编码质量 Q_c 之间的变化趋势可以发现, MOS 和 Q_c 之间呈“S”型曲线。该曲线形式可使用四参数模型(4PL)^[12]表示,具体形式如下:

$$Q_{UTV} = v_1 + \frac{v_2 - v_1}{1 + \left(\frac{Q_c}{v_3}\right)^{v_4}}, \quad (5)$$

式中: v_1 、 v_2 分别表示最大、最小渐近线的值,这里分别取主观评估的最大、最小值 9 和 1, v_3 、 v_4 是待定系数,可以采用最小二乘方法拟合获得,拟合结果如表 4 所示。通过表中数据可以发现,系数 v_3 的取值波动很小,模型将 v_3 的均值作为常系数。而系数 v_4 随分辨率的增大而增大,且呈现出幂函数的关系,如图 5 所示。将这种关系表示为:

$$v_4 = v_5 \times H^{v_6}, \quad (6)$$

式中: H 为视频分辨率的高度像素点个数。 v_5 、 v_6 为常数,可采用最小二乘拟合获得,其值分别为 4.211 和 0.2148。

表 4 四参数法拟合系数 v_3 和 v_4
Tab.4 Fitting coefficients v_3 and v_4 of 4PL

分辨率($W\times H$)	拟合系数 v_3	拟合系数 v_4
720×480	0.887 9	15.66
1 280×720	0.868 4	17.76
1 920×1 080	0.863 6	18.58
3 840×2 160	0.866 1	21.95

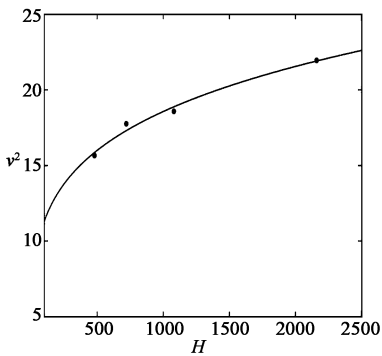


图 5 拟合系数 v_2 和分辨率之间的关系
Fig.5 Relationship between fitting coefficients v_2 and video resolution

4 性能验证

本文使用交叉验证的方法验证模型的性能和鲁棒性。具体而言,首先使用序列 Bike 和 Time Lapse 的测试结果进行训练,序列 New York 和 Bridge 的测试结果进行验证;接着,使用序列 New York 和 Bridge 的测试结果进行训练,序列 Bike 和 Time Lapse 的测试结果进行验证。两次训练得到的模型系数如表 5 所示。可以看到,两次训练得到的模型系数基本相同,说明模型在不同的训练集上均具有较好的鲁棒性。在实际应用中,使用两次训练得到系数的均值作为所提模型的系数。

表 5 交叉训练系数
Tab.5 Coefficients with cross-training

训练序列	拟合系数 v_3	拟合系数 v_5	拟合系数 v_6
Bike 和 Time Lapse	0.878 1	4.019	0.220 9
New York 和 Bridge	0.871 5	4.211	0.214 8
系数均值	0.874 8	4.115	0.217 9

表 6 使用序列 Bike 和 Time Lapse 验证的模型性能
Tab.6 Performance of the model verified with Bike and Time Lapse

	PCC	SRCC	RMSE
SSIM	0.976 4	0.961 6	0.652 3
VIFp	0.970 6	0.967 3	0.718 6
MOVIE	0.952 9	0.938 1	0.777 9
本文模型	0.984 3	0.969 0	0.452 8

表 7 使用序列 New York 和 Bridge 验证的模型性能

Tab.7 Performance of the model verified with New York and Bridge

	PCC	SRCC	RMSE
SSIM	0.973 4	0.958 4	0.740 4
VIFp	0.964 7	0.949 4	0.739 2
MOVIE	0.974 6	0.965 4	0.747 9
本文模型	0.987 5	0.976 9	0.466 5

表 8 使用所有序列验证的模型性能

Tab.8 Performance of the model verified with all sequences

	PCC	SRCC	RMSE
SSIM	0.966 9	0.962 9	0.880 4
VIFp	0.965 0	0.954 7	0.711 9
MOVIE	0.952 3	0.934 0	0.786 3
本文模型	0.980 0	0.961 5	0.486 7

本文将提出的评估模型与经典的 SSIM、VIFp^[3] 和 MOVIE^[13] 视频质量评估算法进行性能比较,评价指标为模型得到的客观质量与主观质量之间的 PCC、斯皮尔曼等级相关系数 (SRCC, Spearman's Rank Correlation Coefficient)^[14-15] 和 RMSE。根据文献[10]中的方法,将 SSIM、VIFp 和 MOVIE 分别映射到与主观质量相同的分值区间。表 6 和表 7 分别是交叉验证中两组验证序列得到的模型性能,表 8 是对所有序列验证的模型性能。可以看出,本文模型均获得了更准确的预测结果。这说明相较于 3 种经典的视频质量评估算法,本文提出的模型能够更加准确的预测 UHDTV 播放不同分辨率视频时的显示质量。图 6 和图 7 分别给出了两组序列的 SSIM、VIFp、MOVIE 和本文模型预测的客观质量和主观实验中得到的主观质量的散点图,图 8 是所有序列的客观质量与主观质量的散点图。由这 3 组图可以看出,本文提出的模型可以很好的预测 UHDTV 视频的显示质量。

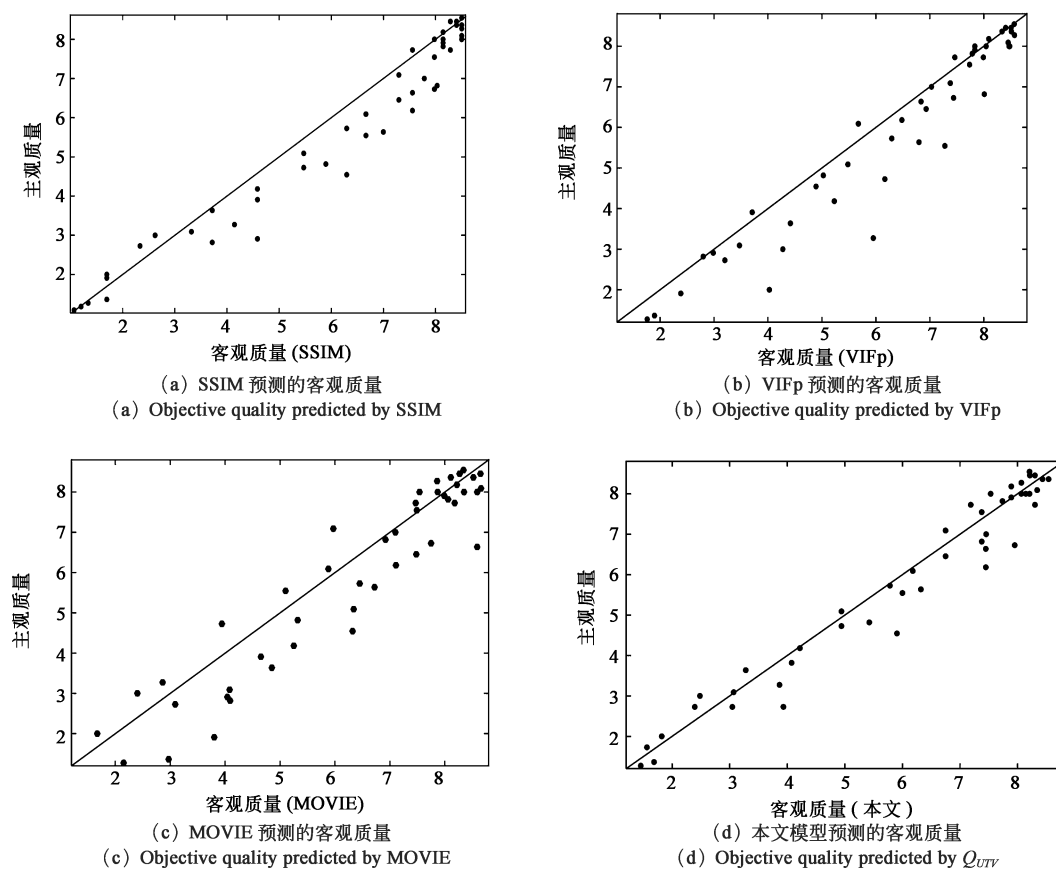


图 6 序列 Bike 和 Time Lapse 的主观质量和客观质量

Fig.6 Subjective and objective quality of Bike and Time Lapse sequences

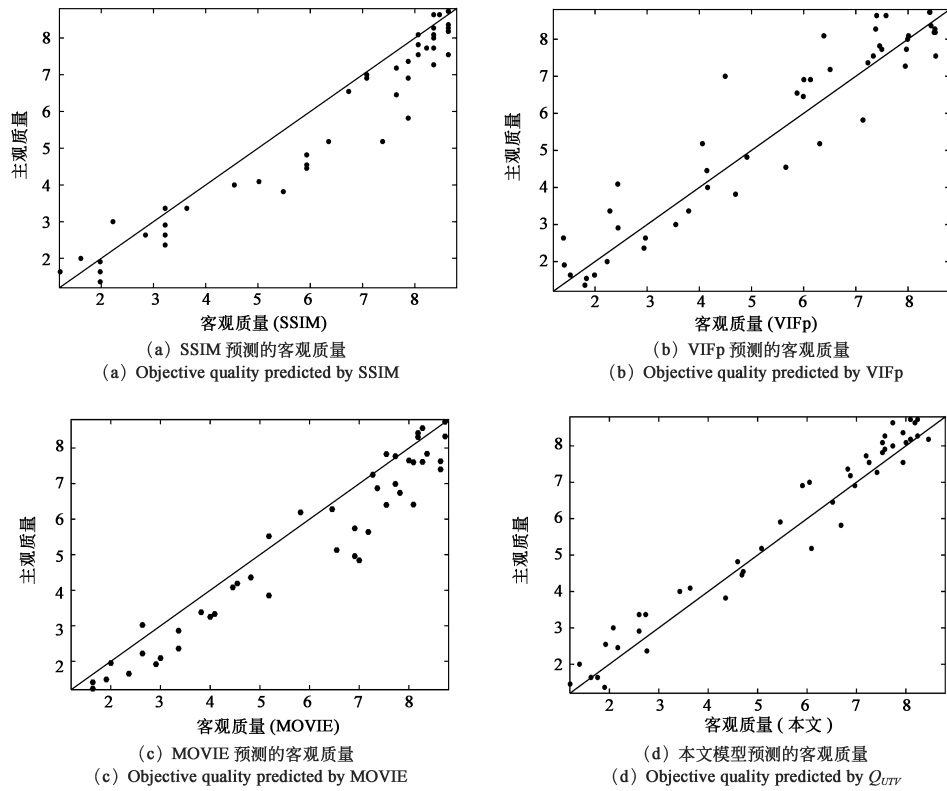


图 7 序列 New York 和 Bridge 的主观质量和客观质量

Fig.7 Subjective and objective quality of New York and Bridge sequences

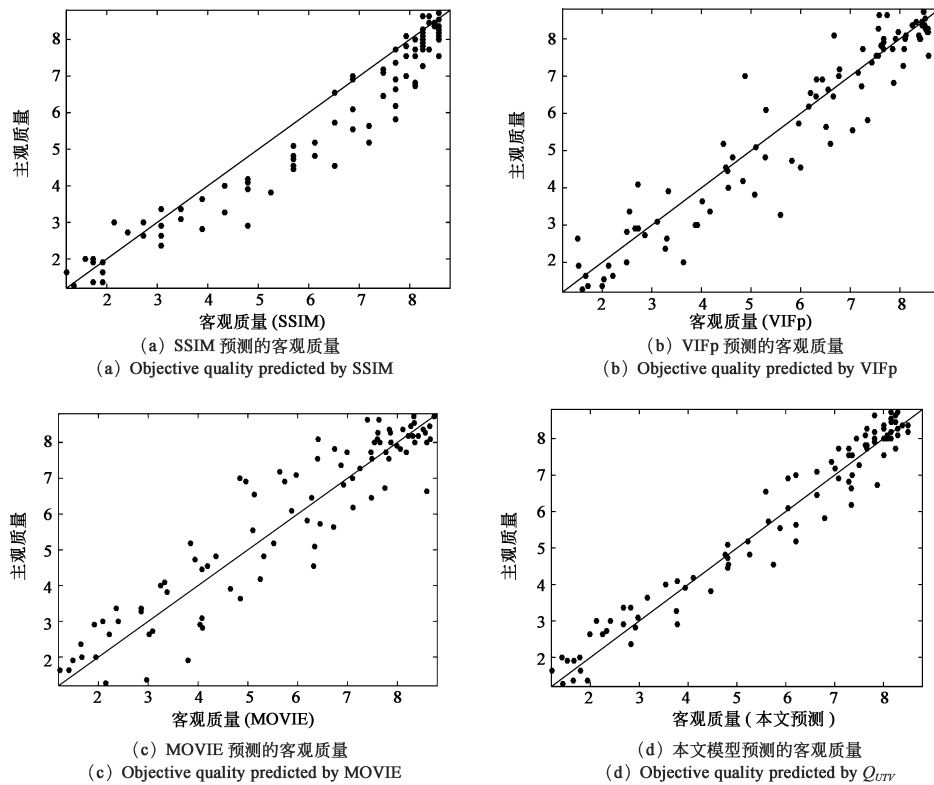


图 8 所有序列的主观质量和客观质量

Fig.8 Subjective and objective quality of all sequences

5 结 论

本文结合视频编码质量和视频分辨率,提出了一种面向UHDTV的视频显示质量评估模型。通过交叉验证与性能比较,本文模型所得视频显示质量和主观质量之间的皮尔森系数分别提高1.13%、1.89%和2.31%,斯皮尔曼等级

相关系数分别提高1.35%、1.53%和2.24%,RMSE降低35.05%、36.94%和39.71%,所以本文提出的模型均能更好的预测UHDTV主流分辨率视频的显示质量。该模型可以用作视频内容提供商和网络运营商在向UHDTV用户提供视频业务时的视频质量预测算法,为视频业务提供有效的技术参考,给用户带来更高质量的视频体验。

参 考 文 献:

- [1] 尹盛,夏淑淳,陈杰.AMOLED的图像缩放及时序控制方案[J].液晶与显示,2011,26(3):334-338.
YIN S, XIA S C, CHEN J. Image scaling and timing control scheme for AMOLED [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(3): 334-338. (in Chinese)
- [2] LI J, KOUDOTA Y, BARKOWSKY M, *et al.* Comparing upscaling algorithms from HD to Ultra HD by evaluating Preference of Experience[C]//Proceedings of the 2014 Sixth International Workshop on Quality of Multimedia Experience (QoMEX), Singapore: IEEE, 2014: 208-213.
- [3] Seshadrinathan K, Soundararajan R, Bovik A C, *et al.* Study of subjective and objective quality assessment of video [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(6): 1427-1441.
- [4] Pinson M H, Wolf S. A new standardized method for objectively measuring video quality[J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2004, 50(3): 312-322.
- [5] LÓPEZ J P, SLANINA M, ARNAIZ L, *et al.* Subjective quality assessment in scalable video for measuring impact over device adaptation[C]//Proceedings of 2013 IEEE EUROCON, Zagreb: IEEE, 2013: 162-169.
- [6] CERMAK G, PINSON M, WOLF S. The relationship among video quality, screen resolution, and bit rate[J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2011, 57(2): 258-262.
- [7] LIAO Y, YOUNKIN A, FOERSTER J, *et al.* Achieving high QoE across the compute continuum: How compression, content, and devices interact[C]//Proceedings of the 7th International Workshop on Video Processing and Quality Metrics for Consumer Electronics, Scottsdale, Arizona, USA, 2013.
- [8] KHAN A, SUN L F, FAJARDO J O, *et al.* Impact of end devices on subjective video quality assessment for QCIF video sequences[C]//Proceedings of the 2011 Third International Workshop on Quality of Multimedia Experience (QoMEX), Mechelen: IEEE, 2011: 177-182.
- [9] ITU-T Recommendation P. Methods for the subjective assessment of video quality, audio quality and audiovisual quality of Internet video and distribution quality television in any environment [Z]. 2014.
- [10] International Telecommunication Union. Methodology for the Subjective Assessment of the Quality of Television Pictures[R]. ITU-R Recommendation BT. 500-13, 2012.
- [11] WANG Y B. Survey of objective video quality measurements[R]. EMC Corporation Hopkinton, MA 01748, USA Technology Report, 2006.
- [12] DAVIS D, ZHANG A, ETIENNE C, *et al.* Principles of Curve Fitting for Multiplex Sandwich Immunoassays [R]. Tech Note 2861. Hercules, CA: Bio-Rad Laboratories, Inc, 2002.
- [13] SESHADRINATHAN K, BOVIK A C. Motion tuned spatio-temporal quality assessment of natural videos[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(2): 335-350.
- [14] Rehman A, Zeng K, Wang Z. Display device-adapted video quality-of-experience assessment[C]// Proceedings of SPIE 9394, Human Vision and Electronic Imaging, San Francisco, California: SPIE, 2015: 939406.
- [15] Video Quality Experts Group. Final report from the Video Quality Experts Group on the validation of objective models of video quality assessment, Phase II (FR_TV2)[EB/OL]. 2003. ftp://ftp.its.bldrdoc.gov/dist/ituvidq/Boulder_VQEG_jan_04/VQEG_PhaseII_FRTV_Final_Report_SG9060E.doc.

作者简介:赵娜(1990—),女,甘肃白银人,硕士研究生,研究方向为视频质量评估。E-mail:nzhao_14@stu.xidian.edu.cn