

## 基于熵权赋权法的灰关联技术的视频质量评价体系研究

王颖, 司占军, 王佳

(天津科技大学, 天津 300222)

**摘要:** **目的** 为了满足视频服务系统根据不同的需要提供不同质量的视频, 并且能够识别和量化质量损失, 使得视频质量能够得到控制和提高, 以满足不同领域的要求。 **方法** 采用基于熵权赋权法的灰关联技术构建了一套视频质量评价体系, 分为视频质量评估系统和灰关联评估模型2个部分。其中视频质量评估系统包含主观评价和客观评价, 主观评价采用标准ITU-T P.910中定义的DCR主观评价方法, 客观评价中包含峰值信噪比、结构相似度、清晰度一点锐度算法、四元数奇异值4个指标算法。 **结果** 多种方法结合进行综合评价优势明显, 解决了主观意识和单指标衡量的局限性问题, 能够全面准确的评价实验视频, 且与人眼相关性高, 客观的反映了视频序列的真实质量。 **结论** 最终的综合评价结果证明, 文中的视频质量评价体系构建合理, 方法选择正确, 思路可行, 达到了较好的评价效果, 对视频质量评价的研究具有一定的指导借鉴意义。

**关键词:** 数字视频; 主观评价; 客观评价; 熵权赋权法; 灰关联技术

**中图分类号:** TS801.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)07-0141-06

## Video Quality Evaluation System of Gray Correlation Technique Based on Entropy Weighting Method

WANG Ying, SI Zhan-jun, WANG Jia

(Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China)

**ABSTRACT:** This study was aimed to enable the video service system to provide different video quality according to different needs, and be able to identify and quantify the loss of quality, so that the video quality can be controlled and improved, in order to meet the requirements of different areas. A set of video quality evaluation system was constructed by using grey correlation technique based on entropy weight method, and divided into video quality assessment system and grey correlation evaluation model. The video quality evaluation system included subjective evaluation and objective evaluation. The subjective evaluation adopted DCR subjective evaluation criteria as defined by the ITU-T P.910 method, and the objective evaluation included peak signal to noise ratio, point sharpness, structural similarity and quaternion singular value as four index algorithms. The comprehensive evaluation combing multiple methods had obvious advantages. It solved the limitations in subjective and single-index evaluation, and could evaluate the experimental videos in a comprehensive and correct manner, with high correlation with human eyes and objective reflection of the real quality of video sequences. The final comprehensive evaluation results proved that the video quality evaluation system in this paper was reasonably constructed, the method were correctly selected, and the method was feasible, achieving good results, which has a certain guiding significance to the study of video quality evaluation .

**KEY WORDS:** digital video; subjective evaluation; objective evaluation; entropy weight method; gray relation technology

收稿日期: 2015-05-11

基金项目: 天津市高等学校科技发展基金计划(20120723)

作者简介: 王颖(1991—), 女, 新疆人, 天津科技大学硕士生, 主攻数字出版技术。

通讯作者: 司占军(1971—), 男, 硕士, 天津科技大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为图形图像处理技术、数字出版技术。

随着互联网的高速发展和数字技术的不断提高,多媒体技术的应用日趋广泛,人们对视频质量的要求也越来越高。这就要求视频服务系统根据不同的需要提供不同质量的视频,并且能够识别和量化质量损失,使得视频质量能够得到控制和提高,以满足不同领域的要求。于是有效的视频质量评价方法成为广泛关注和研究的目標,如何高效率的对视频质量进行评估成为当前质量评价面临的主要问题。

文中所设计的评估系统通过C#编程语言实现,选择视频质量专家组VQEG<sup>[1]</sup>提供的5个场景的视频序列作为评价对象,通过系统计算得到各场景16种失真视频序列的指标值。指标值确定后,利用熵权赋权法确定各场景的指标权重后构建多层次灰关联评估模型,并计算关联度。最终,根据关联度的大小得出综合结果,并进行质量排名,完成视频的质量评价。

## 1 视频质量评价方法

### 1.1 主观评价方法

世界上主要使用的电视广播制式有PAL,NTSC,SECAM 3种,中国大部分地区使用PAL制式,帧频(指每秒钟播放的帧数)为25帧/s,采用每帧625行扫描,即一帧图像有625条扫描线。且根据标准ITU-T P.910<sup>[2]</sup>,为了避免观测者厌烦,并使结果最为可靠,至少需要选择4个不同的场景。依照我国制式及标准规定选择视频质量专家组VQEG(Video Quality Experts Group)网站FRTV Phase I视频测试库<sup>[3]</sup>中提供的5个场景的625视频序列作为实验测试序列,其中每个场景包含1个参考序列和16个失真序列。视频序列格式为YUV,采样格式为4:2:2,分辨率为720像素×576像素,每个序列均包含219帧。这里需要指出的是,实验视频序列是YUV4:2:2采样格式下的一种格式——UYVY格式。

文中选择的实验视频序列的5个场景内容见表1。

实验需对每个失真视频序列相对于原始视频序列的损伤程度进行评价,因此,主观评价选择标准ITU-T P.910中定义的DCR方法<sup>[2]</sup>。DCR方法中测试序列成对出现,且按实际尺寸呈现,每对序列中先呈现的是原始视频序列,后呈现的是该原始序列经过某种处理后的失真视频序列,呈现方式见图1。

图中 $A_i$ 表示测试条件 $i$ 下的序列 $A$ , $B_j$ 表示测试条件 $j$ 下的序列 $B$ , $A_r, B_r$ 表示序列 $A$ 和 $B$ 的原始参考序列。为了更细致的对失真视频进行评价,实验选择九

表1 视频场景内容  
Tab.1 Video scene contents

场景代号	场景名称	场景内容
1	弹琴	深色、放大、高光及人物、竖琴细节
2	划船	水流、运动方向及高处细节
3	赛车	快速运动及饱和度
4	快餐	电影、肤色及人物运动
5	日历	图形、动静结合及色彩

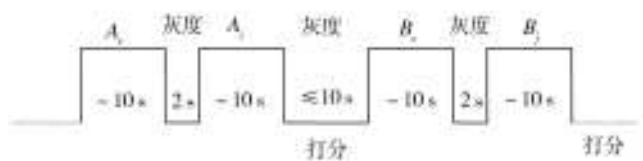


图1 DCR方法中的序列呈现

Fig.1 Sequence presentation in DCR method

级制评分等级:1分表示非常讨厌,3分表示讨厌,5分表示轻微讨厌,7分表示可察觉但不讨厌,9分表示毫无察觉。2,4,6,8分分别是对应两者间的过渡等级分。实验前通过教学视频对测试者进行评价训练,训练内容指标包含亮度,对比度,彩色复制,轮廓清晰度,背景稳定性,图像重组速度,抖动,拖尾效应,蚊子效应,双图像/阴影,光环等。实验中统一使用整数进行评价。评价过程中特别注意评价指导语,如:“当看见图像画质舒适、清晰时可打8或9分”,“当看见图像有轻微色偏或者清晰度稍低但可以忍受时可打5-7分”,“当图像出现严重的色偏、模糊、涂污等问题时可打1-4分”。

### 1.2 客观评价方法

文中的客观评价方法采用全参考模型和无参考模型,选择峰值信噪比(PSNR)、结构相似度(SSIM)、清晰度(点锐度算法)和四元数奇异值4种算法作为客观评价指标。

#### 1.2.1 峰值信噪比(PSNR)

均方误差(MSE)和峰值信噪比(PSNR)应用较为广泛,属于全参考模型。PSNR在MSE的基础上发展而来,利用参考视频和失真视频的每一帧中每个像素的灰度值的均方误差进行评价,见式(1):

$$PSNR = 10 \lg \frac{255^2}{\frac{1}{M \times N} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (1)$$

式中: $x_i$ 和 $\hat{x}_i$ 表示原始视频和失真视频的帧中每一像素的灰度值。 $M, N$ 为视频的高和宽,255为信号

峰值幅度。采用PSNR作为第一个客观评价指标,其优点是便于计算和理解,能大致反应图像质量。一般情况下,图像质量越好PSNR的值越高<sup>[4-7]</sup>。

1.2.2 清晰度——点锐度算法

此算法是对失真视频帧图像中每个像素点周围的灰度扩散情况的统计,扩散程度越剧烈,其值越大,图像也就越清晰<sup>[8]</sup>。由于仅计算失真视频,因此该算法属于无参考模型。点锐度算法见式(2)<sup>[9-10]</sup>:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^{mn} \sum_{a=1}^8 |df/dx|}{mn} \quad (2)$$

式中: $m, n$ 为视频的长和宽; $df$ 为灰度的变化幅度; $dx$ 为像素间的距离增量。

1.2.3 结构相似度(SSIM)

此方法是基于结构失真的全参考视频质量评估方法,基本思想是:图像是高度结构化的,像素之间有很强的相关性,这些相关性包含视觉场景中物体结构的重要信息。这个方法从亮度、对比度和结构相似性3个方面比较原始参考视频序列和测试失真视频序列,然后综合考虑比较结果,原理图如图2<sup>[11-15]</sup>。

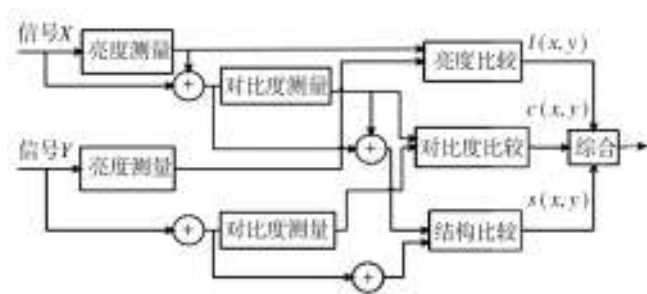


图2 SSIM方法原理图

Fig.2 Schematic diagram of SSIM method

对于原始视频X和失真视频Y,比较亮度 $l(x, y)$ 、对比度 $c(x, y)$ 和结构相似性 $s(x, y)$ ,然后考虑综合结果。

$$SSIM = [l(x, y)]^\alpha \cdot [c(x, y)]^\beta \cdot [s(x, y)]^\gamma \quad (3)$$

式中: $\alpha, \beta, \gamma$ 为权值调整,均取1<sup>[6]</sup>。SSIM值越大,失真视频与原始视频的差异越小。

1.2.4 四元数奇异值

四元数奇异值法因四元数的构建及色彩空间的不同而不同。该算法采用YCbCr空间,四元数选择像素的独立性质——亮度和色度,以及反映空间相关性和时间相关性的边缘能量和残差能量,并将人眼最敏感的亮度作为实部。四元数模型见式(4):

$$S(x, y) = Y(x, y) + C(x, y)i + E(x, y)j + \beta R(x, y)k \quad (4)$$

式中: $i, j, k$ 为虚数单位, $i^2=j^2=k^2=-1$ ;  $\beta$ 为常数,

因为2帧之间残差能量是差值,数值较小,而其他3部分数值较大,所以设 $\beta$ 为标度因子,根据文献[17]设置为5; $Y(x, y)$ 为该像素的亮度,作为实部; $C(x, y)$ 为该像素的色度,作为第1个虚部; $E(x, y)$ 为边缘能量,作为第2个虚部; $R(x, y)$ 为残差能量,作为第3个虚部。

2 实验

依据式(1)~(4),利用C#编写程序实现视频质量评价体系,对上述提到的5个场景分别进行主客观评价分析。

2.1 主观评价实验结果

主观评价实验过程完全按照标准ITU-T P.910进行。实验选择22名具有图像及视频基本知识的主观评价人,其中本科生9人,研究生12人,教师1人。实验后进行数据处理,各场景的16个失真序列的主观评价结果平均值见表2。

表2 主观评价平均结果

Tab.2 Average result of subjective evaluation

失真序列	场景1	场景2	场景3	场景4	场景5
1	5.29	5.59	5.90	6.54	5.75
2	7.41	6.92	7.26	7.32	7.02
3	6.74	6.77	6.95	7.65	6.30
4	7.16	7.04	6.72	7.34	5.99
5	7.70	6.53	6.98	7.13	6.59
6	7.58	6.62	6.83	6.86	6.57
7	7.88	7.12	7.21	7.50	7.18
8	7.03	6.12	6.67	7.31	5.59
9	7.51	5.39	6.41	6.90	6.55
10	7.65	6.05	6.81	7.00	6.70
11	7.65	4.12	5.77	6.05	5.93
12	7.06	5.62	6.32	6.68	6.19
13	5.64	3.76	5.04	6.21	3.18
14	5.51	3.76	5.44	6.32	4.27
15	3.74	3.68	4.89	4.90	1.91
16	5.45	5.00	5.01	5.06	2.57

2.2 客观评价实验结果

对于实验的5个场景来说,每个场景被评价的对象均有16个,每个被评价对象的评价指标有4个。这里以场景1为例,对程序测得的4个指标值构建如下判断矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} 2.4970 & 130.6335 & 0.1744 & 148.9513 \\ 12.3989 & 76.5713 & 0.1613 & 62.2304 \\ 9.6365 & 101.2117 & 0.1743 & 41.0077 \\ 8.6292 & 67.3036 & 0.1532 & 168.3204 \\ 11.8944 & 64.9141 & 0.1504 & 74.1348 \\ 8.1294 & 62.9025 & 0.1497 & 134.6020 \\ 14.2412 & 66.5921 & 0.1545 & 49.1926 \\ 7.5813 & 58.6028 & 0.1453 & 147.5438 \\ 10.5966 & 61.4482 & 0.1472 & 88.2297 \\ 10.6427 & 66.9956 & 0.1517 & 83.5633 \\ 9.3072 & 62.6920 & 0.1487 & 113.1063 \\ 10.9281 & 66.3303 & 0.1531 & 88.7703 \\ 6.9724 & 55.2090 & 0.1375 & 149.8564 \\ 7.9195 & 53.8987 & 0.1375 & 149.8564 \\ 3.8365 & 38.8935 & 0.1212 & 257.8028 \\ 4.1699 & 43.4388 & 0.1286 & 217.9687 \end{bmatrix}$$

其中,第1~16行分别指场景一的16个失真序列,第1~4列分别指峰值信噪比、点锐度、结构相似度、四元数奇异值的4个指标,后文中提到的矩阵中的各行列与此一致。

### 2.3 利用熵权赋权法确定客观评价各指标权重

这里采用熵权赋权法,它是依据熵的概念和性质以及指标相对重要程度的不确定性来分析各指标的权重的,在信息论中,熵值反映了信息的无序化程度,其值越小,系统无序度越小,因此,可以用信息熵评价系统信息的有序度及其效用,即由评价指标值构成的判断矩阵来确定相应指标的权重,它能尽量消除各指标权重计算时的人为干扰,使评价结果更符合实际。利用熵权赋权法确定权重的具体实施过程如下<sup>[6]</sup>:

1) 将判断矩阵  $R$  进行归一化,所得矩阵  $B$  中的各元素用  $b_{ij}$  表示:

$$b_{ij} = \frac{r_{ij} - \min_i r_{ij}}{\max_i r_{ij} - \min_i r_{ij}} \quad (5)$$

式中: $r_{ij}$ 为  $R$  矩阵中,第  $i$  个失真序列在第  $j$  个评价指标上的指标值。实验中每个场景分别有16个失真序列,4个客观评价指标,所以这里  $i=1,2,\dots,16;j=1,2,\dots,4$ 。

矩阵  $R$  根据式(5)得到归一化后的矩阵  $B$ ,如下所示:

$$B = \begin{matrix} & \text{PSNR} & \text{P} & \text{SSIM} & S(x,y) \\ \begin{bmatrix} 0.000\ 000 & 1.000\ 000 & 1.000\ 000 & 0.497\ 906 \\ 0.843\ 131 & 0.410\ 612 & 0.753\ 759 & 0.097\ 893 \\ 0.607\ 917 & 0.679\ 143 & 0.998\ 120 & 0.000\ 000 \\ 0.522\ 147 & 0.309\ 613 & 0.601\ 504 & 0.587\ 249 \\ 0.800\ 174 & 0.283\ 572 & 0.548\ 872 & 0.152\ 804 \\ 0.479\ 590 & 0.261\ 650 & 0.535\ 714 & 0.431\ 718 \\ 1.000\ 000 & 0.301\ 859 & 0.625\ 940 & 0.037\ 754 \\ 0.432\ 920 & 0.214\ 792 & 0.453\ 008 & 0.491\ 414 \\ 0.689\ 668 & 0.245\ 801 & 0.488\ 722 & 0.217\ 819 \\ 0.693\ 593 & 0.306\ 257 & 0.573\ 308 & 0.196\ 294 \\ 0.579\ 878 & 0.259\ 356 & 0.516\ 917 & 0.332\ 566 \\ 0.717\ 895 & 0.299\ 006 & 0.599\ 624 & 0.220\ 312 \\ 0.381\ 073 & 0.177\ 806 & 0.306\ 391 & 0.502\ 081 \\ 0.461\ 717 & 0.163\ 527 & 0.332\ 707 & 0.488\ 383 \\ 0.114\ 056 & 0.000\ 000 & 0.000\ 000 & 1.000\ 000 \\ 0.142\ 445 & 0.049\ 535 & 0.139\ 098 & 0.816\ 259 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

2) 根据熵的概念,可定义16个失真序列的4个评价指标的熵为:

$$H_j = - \left( \sum_{i=1}^{16} f_{ij} \ln f_{ij} \right) / \ln 4 \quad (i=1,2,\dots,16; j=1,2,\dots,4) \quad (6)$$

式中:

$$f_{ij} = b_{ij} / \sum_{i=1}^{16} b_{ij}$$

当  $f_{ij}=0$  时,令  $f_{ij} \ln f_{ij}=0$ 。定义了第  $j$  个指标的熵之后,可得到第  $j$  个指标的熵权定义,即:

$$w_j = \frac{1 - H_j}{4 - \sum_{j=1}^4 H_j} \quad (7)$$

其中: $0 \leq w_j \leq 1; \sum_{j=1}^4 H_j=1$ 。

那么,归一化之后的矩阵  $B$  根据熵的概念所得出的式(6),计算16个失真视频的4个客观评价指标的熵为: $H_{\text{峰值信噪比}}=0.940\ 516, H_{\text{点锐度}}=0.909\ 315, H_{\text{结构相似度}}=0.947\ 639, H_{\text{四元数奇异值}}=0.901\ 326$ 。

计算了4个客观评价指标的熵之后,根据式(7),可得到场景1的4个客观评价指标的权重: $w_{\text{峰值信噪比}}=0.197, w_{\text{点锐度}}=0.301, w_{\text{结构相似度}}=0.174, w_{\text{四元数奇异值}}=0.328$ 。

其他场景各客观评价指标的权重同以上场景1各指标权重的计算方法一样,各场景客观评价指标的权重结果见表3。

### 2.4 基于多层次灰关联评估的视频质量客观评价

灰色关联分析是一种因素分析方法,它的目的就

表3 各场景4个客观评价指标的权重

Tab.3 The weight of four objective evaluation indexes in every scene

场景	峰值信噪比	点锐度	结构相似度	四元数奇异值
1	0.197	0.301	0.174	0.328
2	0.230	0.155	0.161	0.454
3	0.270	0.175	0.197	0.358
4	0.148	0.271	0.129	0.452
5	0.203	0.155	0.118	0.524

是对信息不完全、不确定的系统作因素间的量化和序化,从而对系统进行分析,理论工具是灰色关联度,用于度量2个系统或2个因素间关联性大小的量度,描述系统在发展过程中的因素间相对变化情况。如果2个因素的相对变化态势基本一致,则两者的灰色关联度大;反之,灰色关联度就小。研究主要是通过熵权赋权法确定权重后,利用灰关联技术对4个客观评价指标进行关联度计算。5个场景的实验结果分析方法一致,这里以场景1为例进行灰关联客观评价,过程如下:

场景1关联系数矩阵:

$$E = \begin{bmatrix} \text{PSNR} & P & \text{SSIM} & S(x,y) \\ \Delta_{11} & \Delta_{12} & \Delta_{13} & \Delta_{14} \\ \vdots & & & \vdots \\ \Delta_{m1} & \Delta_{m2} & \Delta_{m3} & \Delta_{m4} \end{bmatrix}$$

每个视频场景共有16种失真情况,即 $m=16$ 。 $\Delta_{ij}$ 表示第 $i$ 个失真序列第 $j$ 个指标与最优对象中第 $j$ 个最优指标的关联系数, $i \in [1, m], j \in D, D$ 为4个指标的集合。

1) 根据上文的判断矩阵 $R$ 来确定最优对象 $S_0$ ,其元素分别为 $r_{\circ}$ 峰值信噪比, $r_{\circ}$ 点锐度, $r_{\circ}$ 结构相似度, $r_{\circ}$ 四元数奇异值。根据各算法原理,可知最优值如下:

$$r_{\circ \text{峰值信噪比}} = \max_i r_i \text{峰值信噪比} \quad (8)$$

$$r_{\circ \text{点锐度}} = \max_i r_i \text{点锐度} \quad (9)$$

$$r_{\circ \text{结构相似度}} = \max_i r_i \text{结构相似度} \quad (10)$$

$$r_{\circ \text{四元数奇异值}} = \min_i r_i \text{四元数奇异值} \quad (11)$$

2) 原始数据规范化处理

$$r'_{ij} = \frac{r_{ij} - \min_i r_{ij}}{\max_i r_{ij} - \min_i r_{ij}} \quad (12)$$

式中: $r'_{ij}$ 是 $R$ 矩阵中的矩阵元。

$$r'_{0j} = \frac{r_{0j} - \min_i r_{ij}}{\max_i r_{ij} - \min_i r_{ij}} \quad (13)$$

3) 关联度计算:

$$r_i = \sum_{j=1}^4 w_j \frac{0.5}{\Delta_{ij} + 0.5} = \sum_{j=1}^4 \frac{1}{2\Delta_{ij} + 1} \quad (14)$$

式中: $\Delta_{ij} = |r'_{0j} - r'_{ij}|$ ;  $w_j$ 为熵权赋权法计算出的4个指标的权重。

$r_i$ 为评估失真序列 $S_i$ 对最优序列 $S_0$ 的关联度,其值越大,失真序列 $S_i$ 与最优对象接近的程度越好,从而得到客观评估结果。此结果作为第一层次中指标系数矩阵中客观评价的指标值。

结合 $R$ 矩阵和 $E$ 矩阵,利用式(8)~(14)进行关联度计算,计算过程中的各指标权重值见表3,场景1序列1~16客观评价的关联度 $r_{\text{客观}}$ 分别为0.7050,0.6790,0.7951,0.4748,0.6072,0.4843,0.7271,0.4579,0.5561,0.5776,0.5138,0.5756,0.4384,0.4479,0.3387,0.3648。

### 2.5 实验结果分析

各场景失真序列客观评价关联度质量排序汇总表4。

通过表4对比可以看出,各场景的16个失真视频序列中,失真序列2,3,7均排在前4位,质量最优,而各场景的失真序列13,14,15,16质量均较差,排序靠后,其中各场景质量最差的序列结果一致,均为失真序列15。而主观评价结果显示,场景1,2,5主观评价结果最高的均为失真序列7,场景3主观评价结果最高的为失真序列2,场景4主观评价结果最高的为失真序列3;5个场景主观评价结果最低的均为序列15。可以

表4 各场景客观评价关联度排序

Tab.4 The quality order of dependent degree of every scene's objective evaluation

场景	质量排序															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
场景1(序列)	3	7	1	2	5	10	12	9	11	6	4	8	14	13	16	15
场景2(序列)	2	3	6	7	4	1	10	8	5	12	9	13	11	14	16	15
场景3(序列)	2	3	7	4	6	1	5	12	10	8	9	11	14	13	16	15
场景4(序列)	7	2	1	3	6	12	10	8	9	4	5	11	14	13	16	15
场景5(序列)	3	2	7	12	9	10	1	5	6	11	4	14	8	13	16	15

看出,各场景16个失真视频序列不仅质量趋势一致,基于熵权赋权法和灰关联技术的客观评价结果与主观评价结果的相关性非常高,符合人的主观感受,能够反映人对视频序列的真实感受,同时也说明了体系构建合理,能够全面准确的评价实验视频。

### 3 结语

文中研究首次将基于熵权赋权法的灰关联评估技术应用于视频质量的客观评价体系中,对视频做出了数值化的、科学准确的综合评价;将主观评价与客观评价进行分析,验证了该客观评价系统设计的合理性,评价过程灵活且易于操作,应用人群范围广,同时解决了主观评价实施的诸多困难。客观评价选择了4个指标算法,考虑了多方面的视频质量影响因素,全面的反映视频质量,解决了衡量单一指标的不准确性和局限性问题。

#### 参考文献:

- [1] VQEG. Final Report from VQEG on the validation of Objective Models of Video Quality Assessment[EB/OL]. ftp://ftp.its.bldrdoc.gov/dist/ituvidq/phase1-final-report, 2000-3-15.
- [2] ITU-T P.910. Subjective Video Quality Assessment Method for Multimedia Application[S]. 2008.
- [3] The Video Quality Experts Group[OL]. http://www.its.bldrdoc.gov/vqeg/projects.aspx.
- [4] 李红蕾. 关于图像质量评价指标PSNR的注记[J]. 广东工业大学学报, 2004, 21(3): 74—78.  
LI Hong-lei. Note on the Evaluation of PSNR Image Quality[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2004, 21(3): 74—78.
- [5] 王汇源. 数字图象通讯原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.  
WANG Hui-yuan. Digital Image Communication Principle and Technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000.
- [6] WANG Nan-nan, ZHANG qiang. Objective Quality Evaluation of Digital Video[C]// Proceedings of the 2000 IEEE Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems, Tianjin, 2000: 791—794.
- [7] PAPPAS T N, MICHEL T A, HINDS P O. Supra-threshold Perceptual Image Coding[J]. Proc.ICIP-96, 1996(1): 237—240.
- [8] 王珊珊, 李学明. 基于清晰度的数字视频客观质量评价方法研究[J]. 广播与电视技术, 2008(10): 105—111.  
WANG Shan-shan, LI Xue-ming. The Objective Quality Evaluation of Digital Video Resolution Method of[J]. Radio and Television Technology, 2008(10): 105—111.
- [9] 王鸿南, 钟文, 汪静, 等. 图像清晰度评价方法研究[J]. 中国图像图形学报, 2004, 9(7): 828—831.  
WANG Hong-nan, ZHONG Wen, WANG Jing. Evaluation Method of Image Definition[J]. Image Chinese Sinica, 2004, 9(7): 828—831.
- [10] ESKICIOGLU A M, FISHER P S. Image Quality Measures and Their Performance[J]. IEEE Transactions on Communications, 1995, 43(12): 2959—2965.
- [11] 邹钧, 姜秀华, 杨爽. 基于边缘结构相似性的视频质量客观评价[J]. 电视技术, 2011, 35(17): 30—32.  
ZOU Jun, JIANG Xiu-hua, YANG Shuang. The Objective Video Quality Evaluation of Edge Structure Similarity[J]. TV Technology, 2011, 35(17): 30—32.
- [12] 朱里. 基于结构相似性的图像质量评价方法[J]. 光电工程, 2007, 34(11): 108—113.  
ZHU Li. Similar to the Structure of the Image Quality Evaluation Method[J]. Electronic Engineering, 2007, 34(11): 108—113.
- [13] WANG Zhou, LIANG Lu, ALAN C. Video Quality Assessment Based on Structural Distortion Measurement[J]. Signal Processing, 2004, 19(1): 1—9.
- [14] WANG Zhou. The Handbook of Video Database: Design and Application[M]. New York: CRC Press, 2003.
- [15] WANG Zhou, ALAN C. Structural Approached to Image Quality Assessment[M]. New York: Academic Press, 2005.
- [16] 佟雨兵, 胡薇薇, 杨东凯, 等. 视频质量评价方法综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(5): 735—741.  
TONG Yu-bing, HU Wei-wei, YANG Dong-kai. Overview of Video Quality Evaluation Methods[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2006, 18(5): 735—741.
- [17] 张富强, 李均利, 李纲. 基于四元数奇异值分解的视频质量评价方法[J]. 电子学报, 2011, (1): 219—223.  
ZHANG Fu-qiang, LI Jun-li, LI Gang. The video quality evaluation method based on the Singular Value Decomposition of Four Elements[J]. Electronic Journal, 2011, (1): 219—223.