

DOI: 10.7652/xjtuxb201306007

网络视频质量包层评估模型研究

宋佳润, 苏洪磊, 杨付正

(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, 710071, 西安)

摘要: 为了实现对网络视频质量的实时监测,提出一种包层视频质量评估模型。该模型无需对视频载荷信息进行解码,只通过分析视频包头信息评估网络视频的质量。首先,分析包头信息获取压缩码率、帧率、每帧编码比特数、丢包数目和丢包位置等信息,利用压缩码率和 I 帧的平均编码比特数预测视频内容的运动特性,在此基础上结合视频帧编码类型及视频内容运动特性预测视频流的编码失真和丢包失真并最终建立包层质量评估模型。实验结果表明,相比国际标准 G. 1070 模型和 G. 1070 增强模型中的视频质量评价方法,通过该模型得到的视频质量与视频主观质量的皮尔森相关系数分别平均提高了 0.087 和 0.065,同时均方根误差降低了 0.219 和 0.164。该模型具有良好的性能,可以准确地评价网络视频质量。

关键词: 网络视频;视频质量评估;编码失真;丢包失真

中图分类号: TN914.42 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)06-0037-07

Packet-Layer Assessment Model for Networked Video Quality

SONG Jiarun, SU Honglei, YANG Fuzheng

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

Abstract: A packet-layer assessment model for video quality is proposed to realize real-time quality monitoring for networked video. The model utilizes only information provided by packet headers without resorting to any payload information. The information, including the bit-rate, the frame rate, the coded bits of each frame, the number of lost packets, and the positions of lost packets, is obtained or estimated by analyzing limited information from packet header. Then, the temporal complexity factor is estimated using the bit-rate and the average coded bits of I-frames. The estimated temporal complexity factor and the frame type are incorporated to evaluate the distortion due to compression first and the distortion due to packet loss afterwards, and the quality for networked video is then generated. Experimental results and comparisons with G. 1070 and Enhanced G. 1070 models show that the proposed model gets an increment of about 0.087 and 0.065 in PCC, and a decrement of about 0.219 and 0.164 in RMSE, respectively. The proposed model can be used to accurately estimate the networked video quality on account of its advanced performance.

Keywords: networked video; video quality assessment; coding distortion; distortion caused by packet loss

收稿日期: 2012-09-17。 作者简介: 宋佳润(1987—),男,博士生;杨付正(通信作者),男,教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60902081,60902052);国家国际科技合作专项资助项目(2010DFB10570);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(72004885);高等学校学科创新引智计划资助项目(B08038)。

网络出版时间: 2013-03-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130318.1139.003.html>

宽带网络的飞速发展和多媒体技术的不断成熟,使得基于互联网协议(Internet Protocol, IP)包交换的网络视频广泛应用于可视电话、视频会议以及网络电视(Internet Protocol Television, IPTV)等业务。然而,在编码和传输过程中,网络视频将分别遭受由量化引起的编码失真和由丢包、时延等网络损伤引起的传输失真,严重影响了用户对视频业务的体验质量(Quality of Experience, QoE)^[1]。因此,提供准确可靠并且能够持续监测网络视频质量的客观评估方法具有重要意义。

根据所使用的视频信息的类型及对视频流的介入程度,网络视频客观质量评估模型可以具体分为参数规划模型、包层模型、比特流层模型、媒体层模型以及混合模型^[2]。参数规划模型根据网络和承载视频的参数预测传输视频的质量,该模型常用于网络以及业务规划,即在已知网络状况的情况下预测传输不同参数的视频流可以得到的视频质量。包层模型只分析包头信息,不介入视频载荷信息。比特流层模型不仅可以使包层信息,而且还可以进一步分析视频流的载荷信息。媒体层模型通常也称为基于像素的评价模型,该类模型可以对视频流解码,利用视频的内容信息以及解码特性来预测视频的质量。混合模型允许同时使用恢复视频和比特流信息进行质量评价,由于可用信息较多,该类模型往往具有较好的性能。

包层模型只需通过分析网络视频流的包头信息来预测视频质量,因此计算复杂度低,适用于在网络节点对视频质量进行实时监控,且包层模型不需要对视频流解码,非常适用于视频载荷信息经过加密的应用场景。近年来,视频质量包层评估模型已经成为了视频质量评估领域的研究热点,国际电信联盟第 12 研究组(The 12th Study Group, Telecommunication Standardization Sector, International Telecommunication Union, ITU-T SG12)正在制定视频质量包层评估模型标准 P. NAMS^[3]。文献[4]提出采用压缩码率和丢包率计算网络视频的编码失真和丢包失真,文献[5]考虑了突发丢包长度的影响,利用压缩码率和丢包频率评价视频的质量,但这 2 种模型只是单纯使用统计参数获得视频质量的平均值,不能反映序列个体间的差异。文献[6]提出根据比特率预测视频帧的类型,确定数据包丢失引起的错误传播长度,进而评价视频流质量,然而由于没有考虑视频内容运动特性的影响,该模型无法对不同内容视频的质量进行有效的评价。

本文结合码率、帧率、内容运动特性、帧类型、丢包位置和错误传播特性等因素,提出了一种包层的视频质量评价模型,由于充分考虑到视频帧编码类型及视频内容运动特性对视频质量的影响,因此本文提出的模型能够更准确地评价网络视频质量,且可以实时地对网络视频质量进行评价。

1 编码失真评估

1.1 编码失真与码率

影响网络视频质量的主要因素为编码压缩和数据包丢失^[7]。压缩码率是反映视频编码失真的一个重要因素。文献[4, 8-9]分别给出了压缩码率和编码失真之间不同的关系形式,文献[10]对上述几种模型进行比较后得到文献[9]所提出的 G. 1070 增强模型具有更好的性能的结论。

然而,仅利用压缩码率而不考虑视频内容运动特性并不能准确评价视频序列的质量^[11]。本文选取 4 个不同内容特性的 QCIF(quarter common intermediate format)序列,如图 1 所示,分别对各个序列在恒定压缩码率 48、90、128、256、512、1 024 kb/s 下按 IPPP 形式进行编码,1 帧间隔为 2 s,然后参照 ITU-R BT. 500-11 建议给出的测试条件对各个序列进行主观测试实验^[12],由 25 名非专业人员使用单刺激评估法(Single Stimulus Methods, SSM)进行主观评估实验,得到平均主观分值 V_{MOS} 。图 2 给出不同内容特性的视频序列 V_{MOS} 值随压缩码率变

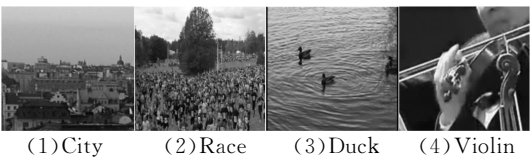


图 1 实验序列

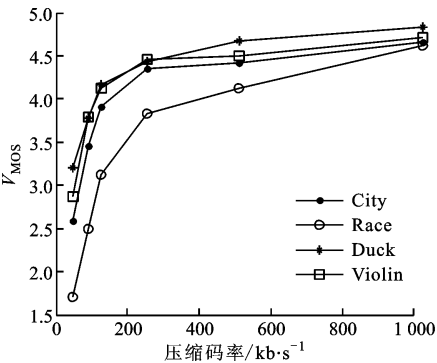


图 2 不同内容特性的视频序列主观评估值与压缩码率的关系

化的示意图,可以看出各视频序列的 V_{MOS} 值都随压缩码率的增加而逐渐增大,并且当达到一定压缩码率后 V_{MOS} 值趋于稳定,但不同内容特性的序列在相同的压缩码率下的编码质量并不相同。例如,当压缩码率为 128 kb/s 时,运动较剧烈的 Race 序列的 V_{MOS} 值(3.13)比运动缓慢的 Duck 序列的 V_{MOS} 值(3.92)低 0.79,由此可见编码失真不仅受压缩码率影响,而且还与视频内容运动特性紧密相关。

1.2 时间复杂度因子的预测

视频序列的时间复杂度能够有效地反映视频序列的运动特性,对准确评价视频质量具有重要的意义。文献[13]用运动矢量表示视频的运动特性,文献[14]利用运动补偿后的残差信号像素方差预测视频的时间复杂度,文献[15]则利用量化参数和压缩码率预测时间复杂度。但是,以上包层视频质量评价模型只允许分析包头信息,无法获取量化参数、残差信号像素的方差和运动矢量等信息。通过实验和分析发现:在同一压缩码率下,编码运动剧烈的序列时,P 帧占用的比特数较多,I 帧占用的比特数相对较少;编码运动缓慢的序列时,P 帧占用的比特数较少,I 帧的编码比特数相对较大,因此本文采用时间复杂度因子 δ_t 来反映视频内容的运动特性

$$\delta_t = (B_r / (a_1 F_{\text{size}_I}))^{1/2} \tag{1}$$

式中: B_r 为压缩码率; F_{size_I} 为 I 帧平均编码比特数;调节参数 $a_1=15$ 。按 1.1 小节中的实验步骤,可以统计不同序列在各压缩码率下 I 帧的平均编码比特数,各帧类型可通过文献[16]提出的帧类型检测方法获得。由于运动剧烈序列的 δ_t 值相对较大,运动缓慢序列的 δ_t 值相对较小,因此 δ_t 可以有效反映视频内容的运动特性。

1.3 编码失真模型

通过分析比较,国际标准 G. 1070 模型及其增强模型所采用的计算形式能够更好地反映压缩码率与视频编码质量之间的关系^[10]

$$Q_s = 1 + v_1 \left(1 - 1 / \left(\frac{B_r}{v_2} \right)^{v_3} \right) \tag{2}$$

式中: Q_s 表示视频的编码质量; v_1 、 v_2 和 v_3 是待定系数。图 2 中 4 个测试序列的 v_1 、 v_2 、 v_3 值如表 1 所示。观察表 1 中数据发现:不同序列 v_1 的值变化很小,可近似看作常数; v_2 和 v_3 的值变化较为明显且分别与时间复杂度因子 δ_t 近似成线性关系,如图 3 所示,可分别表示为

$$v_2 = a_2 \delta_t + b_2 \tag{3}$$

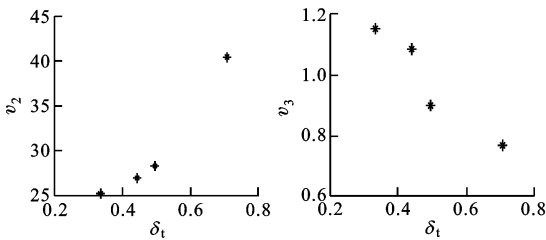
$$v_3 = a_3 \delta_t + b_3 \tag{4}$$

式中: $a_2=42.68$ 、 $b_2=9.14$ 、 $a_3=-1.05$ 、 $b_3=1.49$,通过最小二乘拟合获得。将式(3)和式(4)带入式(2),得到

$$Q_s = 1 + v_1 \left(1 - 1 / \left[1 + \left(\frac{B_r}{a_2 \delta_t + b_2} \right)^{a_3 \delta_t + b_3} \right] \right) \tag{5}$$

表 1 4 个测试序列的 v_1 、 v_2 和 v_3 的值

序列	v_1	v_2	v_3
City	3.88	28.29	0.89
Race	3.86	39.61	0.68
Duck	3.82	23.28	1.15
Violin	3.85	27.03	1.08



(a) v_2 与 δ_t 之间的关系 (b) v_3 与 δ_t 之间的关系

图 3 v_2 和 v_3 与 δ_t 之间的关系

考虑到帧率变化对视频质量的影响,研究发现对数函数可以更准确地反映帧率和视频质量之间的关系^[15]。因此,本文结合帧率和视频内容运动特性进一步预测视频的编码质量

$$Q_c = (1 + a_5 \delta_t + b_5 \delta_t \ln(n/F_r)) (1 + a_4 (1 - \frac{1}{1 + (B_r(m/F_r)/(a_2 \delta_t + b_2))^{a_3 \delta_t + b_3}})) \tag{6}$$

式中:系数 $a_4=3.85$ 、 $a_5=2.83$ 、 $b_5=-0.81$ 通过最小二乘拟合获得; $m=30$; $n=1\ 000$ 。实验发现:当帧率低于 30 帧/s 时,序列时间复杂度越高,其不连续性越明显,质量下降相对剧烈^[15];当帧率大于或等于 30 帧/s 时,认为视频质量不受帧率影响, $1 + a_5 \delta_t + b_5 \delta_t \ln(n/F_r)$ 的值恒等于 1。

2 丢包失真评估

数据包丢失是影响网络视频质量的另一个重要因素。当视频遭受数据包丢失时,往往采用时域错误掩盖方法来恢复视频,视频的时域相关性是影响时域错误掩盖方法效果的重要因素,所以数据包丢失对视频质量的影响与视频内容运动特性密切相关。另外,数据包丢失不仅会对其所在的视频帧造成失真,还会通过错误传播影响后续的帧。文献[17]在分析数据包丢失对视频质量影响时考虑了平

均丢包率,文献[18]在分析平均丢包率的基础上还考虑了平均突发丢包长度对视频质量的影响,然而丢包率和丢包突发性无法反映错误传播和视频内容运动特性对视频质量的影响,这类模型不能精准地预测视频质量。本文根据丢包位置和错误传播特性,着重分析视频帧受损情况并结合视频内容运动特性和编码质量预测视频序列的丢包失真。

2.1 帧受损情况对丢包失真的影响

考虑到丢包位置和错误传播特性对视频质量的影响,将受到丢包或者错误传播影响的帧定义为受损帧。引入丢包受损帧数、平均受损率以及平均每帧受损率3个反映帧受损情况的参数来预测视频序列的丢包失真。其中:丢包受损帧数为视频序列中发生丢包的帧的数量;平均受损率为视频序列中受损帧占总帧数的比例;平均每帧受损率为发生丢包的帧中丢失的比特数占总比特数的比例的平均值。

通过实验分析以上3个参数与视频序列丢包失真之间的关系。选取City、Race、Duck和Violin测试序列,在压缩码率为48、90、128、256 kb/s下按IPPP形式编码,I帧间隔为2 s,帧率为30帧/s,然后对编码后数据打包,分别在1%、3%和6%的丢包率下统计各序列的丢包受损帧数量、平均受损率以及平均每帧受损率,对各个序列进行主观测试实验,得到平均主观分 V_{MOS_loss} 。结合式(6)中计算的编码质量 Q_c ,可以得到归一化的视频质量下降值

$$D_{loss} = \frac{Q_c - V_{MOS_loss}}{Q_c - 1} \quad (7)$$

图4给出了丢包受损帧数与 D_{loss} 之间的关系。可以明显看出: D_{loss} 值随着丢包受损帧数的增加而逐渐增大,并且各个序列的 D_{loss} 值增长程度不同;时间复杂度较大的Race序列对应的 D_{loss} 值增长更加迅速;时间复杂度较小的Duck序列对应的 D_{loss} 值增长缓慢。

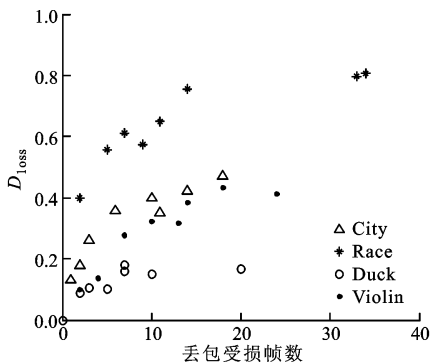


图4 丢包受损帧数与视频质量下降值之间的关系

将平均受损率和平均每帧受损率的乘积定义为帧损伤因子 K_p ,该因子反映了序列中受影响帧的损伤程度。图5给出了视频质量下降与帧损伤因子之间的关系。由图5可以看出,各序列对应的 D_{loss} 值随 K_p 值的增加而逐渐增大,对于不同内容特性的序列, D_{loss} 值增长程度也不相同。

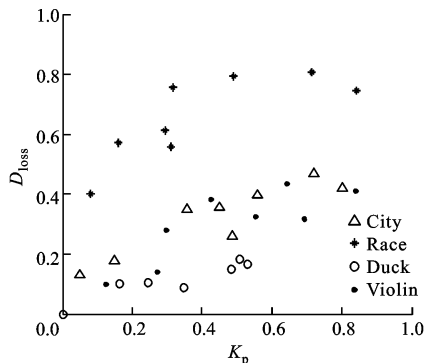


图5 视频质量下降值与帧损伤因子之间的关系

综上所述, D_{loss} 与丢包受损帧数、平均受损率以及平均每帧受损率之间的关系可表示为

$$D_{loss} = 1 - \exp\left(-\left(\frac{N_{fl} K_p}{a_6}\right)^{b_6}\right) \quad (8)$$

式中: N_{fl} 是丢包受损帧数; a_6 和 b_6 为待定系数,通过最小二乘拟合获得。

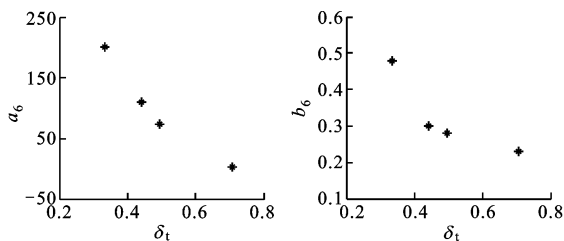
2.2 时间复杂度因子对丢包失真的影响

由图4和图5中可以看出,不同内容特性的序列对应的 D_{loss} 值变化并不相同,由此可知 D_{loss} 值不仅与帧受损情况有关,还与视频内容特性紧密相关。表2为根据式(8)对图4和图5中各序列拟合得到的 a_6 和 b_6 值,可以发现不同序列的 a_6 和 b_6 变化较为明显,如图6所示。 a_6 和 b_6 与时间复杂度因子呈线性关系,可以表示为

$$a_6 = a_7 \delta_t + b_7 \quad (9)$$

$$b_6 = a_8 \delta_t + b_8 \quad (10)$$

式中:系数 $a_7 = -376$ 、 $b_7 = 366$ 、 $a_8 = -0.59$ 、 $b_8 = 0.61$ 通过最小二乘拟合获得。



(a) a_6 与 δ_t 之间的关系 (b) b_6 与 δ_t 之间的关系

图6 a_6 和 b_6 与 δ_t 之间的关系

表 2 4 个测试序列的 a_6 和 b_6 值

序列	a_6	b_6
City	72.6	0.28
Race	2.8	0.23
Duck	201.3	0.48
Violin	109.3	0.31

综上所述,将式(7)、(9)和式(10)带入式(8)中,可以获得视频序列的质量

$$Q = Q_c - (Q_c - 1) \left(1 - \exp \left(- \left(\frac{N_{fl} K_p}{a_7 \delta_i + b_7} \right)^{a_8 \delta_i + b_8} \right) \right)$$

(11)

至此,本文建立了一个包层网络视频质量评估模型,其基本框架如图 7 所示。本文模型通过分析包头获取压缩码率、帧率、每帧编码比特数、丢包数和位置等信息,进而预测视频帧类型、视频内容运动特性等信息,然后利用压缩码率、帧率以及内容运动特性信息预测视频的编码失真;利用丢包信息、帧类型、内容运动特性信息以及编码失真预测视频的丢包失真,最后得到视频的质量。

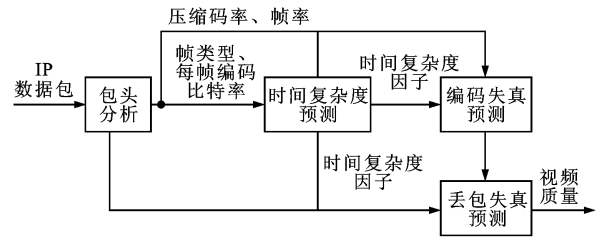


图 7 网络视频质量的包层评估模型

3 实验结果与性能分析

本文实验统一采用国际标准 P. NAMS 推荐的 x264 编码器^[19],实验所用的 8 个测试序列及其内容特性如表 3 所示。视频序列格式为 QCIF,I 帧间隔设置为 2 s,编码模式为 IPPP。当压缩码率为 48、96 kb/s 时帧率设置为 15 帧/s,当压缩码率为 130、192、384、768 kb/s 时,帧率设置为 25 帧/s,共计 48 个序列。为了模拟 IP 网络丢包,采用 RTP/UDP/IP 协议栈对压缩码率为 48、96、130、192、384 kb/s 的视频流进行打包封装处理,每包最大负载长度为 1.5 kB,对打包数据进行 Markov 随机丢包,丢包率分别为 1%、3%和 6%,共计 120 个序列。解码丢包后的视频流采用零运动误码掩盖方法(Zero Motion Error Concealment,ZMEC)进行处理,最后对解码后的视频序列进行主观评估实验,获得各视频序列

的 V_{MOS} 值。实验条件与 1.1 小节中一致。该实验结果适用于使用 x264 软件平台生成的 H. 264/AVC 编码视频序列,若用于由其他编码器生成的视频序列,实验参数需重新拟合。

表 3 测试序列及其内容特性

视频序列	序列内容特性
City	航拍,缓慢平移
Race	运动剧烈,场景切换
Duck	运动平缓
Violin	相机镜头平移
Drum	运动适中
Water	运动平缓
Football	运动剧烈
Garden	运动适中,场景切换

通过计算主观质量分数和本模型所得的客观质量分数的皮尔森相关系数 V_{PCC} 和均方根误差 V_{RMSE} 来对模型性能进行评价。 V_{PCC} 反映了客观质量预测值与主观质量预测值的接近程度,其值越接近 1,算法性能越好; V_{RMSE} 用来检测客观质量预测值偏离主观质量预测值的程度,其值越低,算法性能就越好。将本文模型与国际标准 G. 1070(模型 I)和 G. 1070 增强模型^[9](模型 II)的性能比较,得到反映编码性能的 V_{PCC_coded} 和 V_{RMSE_coded} 以及反映整体性能的 V_{PCC_all} 和 V_{RMSE_all} ,结果如表 4 所示。由于能够更准确地预测视频序列的内容特性,本文提出的模型具有更好的性能,可以准确地评价视频序列的质量。图 8~图 10 分别给出了本文提出的模型和模型 I、

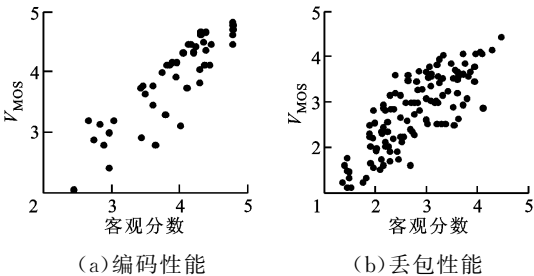


图 8 本文提出模型主客观质量散点图

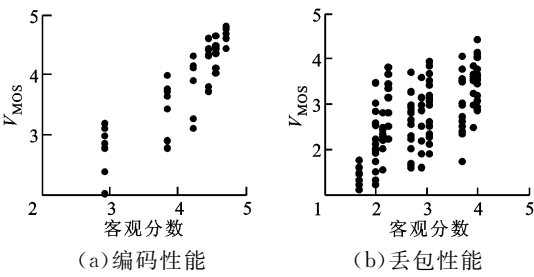


图 9 模型 I 的主客观质量散点图

表 3 3 种模型的性能参数比较

测试 序列	V_{PCC_coded}			V_{RMSE_coded}			V_{PCC_all}			V_{RMSE_all}		
	本文	模型	模型	本文	模型	模型	本文	模型	模型	本文	模型	模型
	模型	I	II	模型	I	II	模型	I	II	模型	I	II
City	0.956	0.934	0.873	0.191	0.304	0.565	0.874	0.739	0.821	0.356	0.547	0.520
Race	0.991	0.893	0.959	0.187	0.712	0.582	0.834	0.711	0.804	0.610	0.942	0.643
Duck	0.996	0.958	0.994	0.197	0.204	0.080	0.788	0.848	0.819	0.543	0.579	0.491
Violin	0.998	0.923	0.954	0.071	0.251	0.239	0.792	0.701	0.703	0.475	0.584	0.583
Drum	0.916	0.989	0.978	0.551	0.141	0.414	0.838	0.809	0.792	0.464	0.459	0.549
Water	0.986	0.942	0.996	0.369	0.418	0.176	0.843	0.789	0.792	0.441	0.506	0.501
Football	0.988	0.908	0.972	0.131	0.264	0.213	0.890	0.597	0.685	0.463	0.832	0.634
Garden	0.969	0.990	0.980	0.143	0.195	0.144	0.801	0.535	0.555	0.649	0.824	0.787
全部	0.890	0.868	0.890	0.324	0.392	0.372	0.781	0.694	0.716	0.457	0.676	0.621

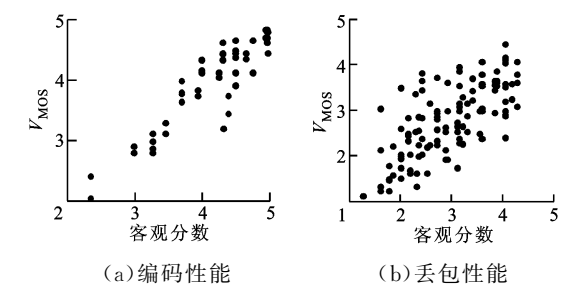


图 10 模型 II 的主客观质量散点图

模型II所得的编码客观质量和丢包质量与主观质量分数的散点图。通过比较,可以直观地验证上述结论。

4 结 论

本文提出了一种适用于网络视频流的包层质量评估模型。该模型不仅分析了视频序列的编码失真,还研究了丢包对视频质量造成的影响。通过分析包头,获得压缩码率、帧率、帧类型、丢包数目和丢包位置等信息,并进一步预测出反映视频内容运动特性的时间复杂度因子,使该模型可以对不同内容特性的视频序列的质量作出自适应的评价。实验结果表明,使用该模型预测的客观质量分数与主观质量分数具有很好的一致性。由于具有优异的性能,该模型能够准确地评价视频的质量,可以应用于对网络视频业务的实时监控和评价。

参考文献:

[1] 杨付正, 万帅. 网络视频质量评估技术研究现状及发展动向 [J]. 通信学报, 2012, 33(4): 107-114.
YANG Fuzheng, WAN Shuai. Overview of state-of-the-art and future of networked video quality assessment [J]. Journal on Communications, 2012, 33(4):

107-114.
[2] TAKAHASHI A, YOSHINO H, KITAWAKI N. Perceptual QoS assessment technologies for VoIP [J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(7): 28-34.
[3] Telecommunication Standardization Sector. ITU-T SG12 temporary document TD 297 Updated draft terms of reference for P. NAMS [S]. Geneva, Switzerland: Telecommunication Steandardization Sector, 2010.
[4] RAAKE A, GARCIA M, BERGER J, et al. T-V-Model: parameter-based prediction of IPTV quality [C] // Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 1149-1152.
[5] YAMAGISHI K, HAYASHI T. Parametric packet-layer model for monitoring video quality of IPTV services [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Communications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 110-114.
[6] YAMADA T, YACHIDA S, SENDA Y, et al. Accurate video-quality estimation without video decoding [C] // Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 2426-2429.
[7] WU Hongren, RAO K R. Digital video image quality and perceptual coding [M]. Boca Raton: CRC Press, 2006: 87-122.
[8] JOSKOWICZ J, LOPEZ-ARDAO J C, ORTEGA M G, et al. A mathematical model for evaluating the perceptual quality of video [C] // Proceedings of International Workshop on Future Multimedia Networking. Berlin, Germany: Springer, 2009: 164-175.
[9] JOSKOWICZ J, LOPEZ-ARDAO J C, Enhancements

- to the opinion model for video-telephony applications [C] // Proceedings of International Latin American Networking Conference. New York, USA: ACM, 2009: 87-94.
- [10] JOSKOWICZ J, LOPEZ-ARDAO J C. A general parametric model for perceptual video quality estimation [C] // Proceedings of 2010 IEEE International Workshop on Communications Quality and Reliability. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 1-6.
- [11] SU Honglei, YANG Fuzheng, SONG Jiarun. Packet-layer quality assessment for networked video [J]. International Journal of Computers, Communications, and Control, 2012, 7(3): 541-549.
- [12] Telecommunication Standardization Sector. ITU-R BT. 500-11 Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures [S]. Geneva, Switzerland: Telecommunication Standardization Sector, 2002.
- [13] 苏洪磊, 李兵兵, 杨付正. H. 264/AVC 网络视频编码失真评估的比特流层模型 [J]. 西安交通大学学报自然, 2012, 46(6): 36-41.
- SU Honglei, LI Bingbing, YANG Fuzheng. A bit-stream-layer model for assessing coding distortion of H. 264/AVC networked video [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(6): 36-41.
- [14] Telecommunication Standardization Sector. ITU-T recommendation P. 910 Subjective video quality assessment methods for multimedia applications [S]. Geneva, Switzerland: Telecommunication Standardization Sector, 2008.
- [15] YANG Fuzheng, WAN Shuai, XIE Qingpeng. No-reference quality assessment for networked video via primary analysis of bit-stream [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2010, 20(11): 1544-1554.
- [16] LIAO Ning, CHEN Zhibo. A packet-layer video quality assessment model based on spatiotemporal complexity estimation [EB/OL]. (2010-08-04)[2012-06-12]. <http://dx.doi.org/10.1117/12.863473>.
- [17] 张大陆, 张起强, 胡治国, 等. IP 网络中视频流 QoE 评价模型 [J]. 计算机与工程与应用, 2012, 48(3): 83-87.
- ZHANG Dalu, ZHANG Qiqiang, HU Zhiguo, et al. Video stream QoE estimation model in IP network [J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(3): 83-87.
- [18] YOU Fenghua, ZHANG Wei, XIAO Jun. Packet loss pattern and parametric video quality model for IPTV [C] // Proceedings of the 8th IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 824-828.
- [19] AIMAR L, MERRITT L, PETIT E, et al. x264-a free h264/AVC encoder [CP/OL]. (2011-04-26) [2011-05-12]. <http://www.videolan.org/developers/x264.html>.

(编辑 刘杨)

(上接 36 页)

- [8] DEL RE E, GORNI G, RONGA L S, et al. A power allocation strategy using game theory in cognitive radio networks [C] // Proceedings of IEEE 2009 International conference on Game Theory for Networks. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 117-123.
- [9] MOROSI S, JAYOUSI S, DEL R E. Cooperative delay diversity in hybrid satellite/terrestrial DVB-SH system [C] // Proceedings of IEEE 2010 International Conference on Communications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 1-5.
- [10] European Telecommunications Standard Institute. EN 302 583 Rev. 1.2.1 Digital video broadcasting (DVB): framing structure, channel coding and modulation for satellite services to handheld devices (SH) below 3 GHz [S]. Sophia Antipolis, France: ETSI, 2011: 1-80
- [11] YUN Y H, CHO J H. An optimal orthogonal overlay for a cyclostationary legacy signal [J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(5): 1557-1567.
- [12] TADROUS J, SULTAN A, NAFIE M. Admission and power control for spectrum sharing cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(6): 1945-1955.
- [13] XU D, FENG Z Y, LIU Y, et al. Outage probability minimizing joint channel and power allocation for cognitive radio networks [J]. IEEE Electronics Letters, 2011, 47(25): 1402-1404.
- [14] 魏静萱. 解决单目标和多目标优化问题的进化算法 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009
- [15] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C] // Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Neural Networks. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1995: 1942-1948.

(编辑 刘杨)