doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.01.007

引用格式:林国川,何小海,李向群,等. 基于感兴趣区域的 HEVC 压缩性能优化[J]. 电讯技术,2016,56(1):38-43. [LIN Guochuan, HE Xiaohai, LI Xiangqun, et al. ROI-based HEVC video compression optimization[J]. Telecommunication Engineering,2016,56(1):38-43.]

基于感兴趣区域的 HEVC 压缩性能优化*

林国川1,何小海**1,李向群1,2,于成业1

(1.四川大学 电子信息学院,成都 610065;2. 西北民族大学 电气工程学院,兰州 730124)

摘 要:根据人类视觉系统(HVS)对纹理复杂及运动区域具有较强感知度的特点,提出了一种基于 感兴趣区域的高效率视频编码(HEVC)压缩性能优化算法。首先使用 Sobel 梯度检测算子和运动矢 量分别检测纹理复杂区域和运动区域,把检测到的纹理复杂及运动区域定义为感兴趣区域;再对感 兴趣区域分级,通过调整量化参数(QP),优化比特分配。实验结果表明,与 HEVC 标准算法相比,所 提算法码率平均减少了 15.29%,时间平均节省了 11.38%。

ROI-based HEVC Video Compression Optimization

LIN Guochuan¹, HE Xiaohai¹, LI Xiangqun^{1,2}, YU Chengye¹

(1. College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;2. School of Electrical Engineering, Northwest University for Nationalities, Lanzhou 730124, China)

Abstract: According to the feature that Human Visual System(HVS) has acute recognition of motion and complex texture, this paper presents a Region of Interest(ROI) – based High Efficiency Video Coding (HEVC) video compression algorithm. First, Sobel operator and motion vectors are applied to detect the complex texture area and motion area respectively which are, as a result, defined as ROI. Second, all the ROIs are graded, and then digital bits allocation is optimized by regulating the quantization parameter (QP). Experimental result shows that compared with the standard HEVC algorithm, the proposed algorithm brings down the coding rate by 15.29% and working time by 11.38%.

Key words: high efficiency video coding; video compression; region of interest; edge detection; human visual system; performance optimization

1 引 言

随着高清视频业务的飞速发展,新一代视频压缩标准——高效率视频编码(High Efficiency Video Coding, HEVC)^[1]应运而生。作为最新的视频编码标准相标准,与之前主流的 H. 264/AVC^[2]视频编码标准相

比,它拥有更加灵活的编码结构,主要表现在以下几 个方面:第一,HEVC采用编码单元(Coding Unit, CU)、预测单元(Prediction Unit,PU)和变换单元 (Transform Unit,TU),宏块的大小从H.264的16× 16扩展到64×64;第二,HEVC拥有更多帧内预测方

^{*} 收稿日期:2015-04-10;修回日期:2015-07-28 Received date:2015-04-10;Revised date:2015-07-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61471248);四川省科技计划项目(2015JY0189);四川省教育厅 2014 年研究生教育改革创新 项目(2014-教-034)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61471248); The Science and Technology Program of Sichuan Province(2015JY0189); The Graduate Education Innovation Program of Sichuan Provincial Education Department in 2014(2014 – teach -034)

^{**} 通信作者 : hxh@ scu. edu. cn **Corresponding author** : hxh@ scu. edu. cn

向,每种 PU 尺寸有 35 种预测方向;第三,HEVC 拥 有更多帧间预测模式,包括对称 PU 模式和非对称 PU 模式。尽管 HEVC 比 H. 264 节省 50% 左右的编 码码率,但随着人们对观看高清视频的需求越来越 高,如何在保持视频质量的同时,节省视频的数据量 仍然是学术界的热点。

对人类视觉系统(Human Visual System, HVS)^[3]特性的研究表明,人眼对图像的不同部分的 感知度是不同的。感知度强的区域往往是人们感兴 趣的区域,比如运动区域、纹理复杂区域、人脸等区 域,其他区域则为非感兴趣区域。基于 HVS 这些特 性,可用其来指导现有的视频编码。然而,HEVC 中 还没有采用感兴趣区域(Region of Interest, ROI)编 码技术。因此,基于感兴趣区域的 HEVC 视频压缩 编码是一个值得深入研究的问题。

目前学术界关于感兴趣区域的编码已有一些研 究。文献[4]提出综合颜色、亮度、方向及肤色4种 人眼视觉特征来进行感兴趣区域检测,然而此方法 忽略了重要的运动视觉特征,使其感兴趣区域提取 效果并不够理想。也有使用平均绝对偏差(Mean Absolute Deviation, MAD)值的方法来检测运动区 域^[5],但此方法只单一地考虑到了运动区域,而没 有认识到实际视频序列中非运动的纹理复杂区域也 是人眼感兴趣区域,因而适用范围比较狭窄。文献 [6]把包含医学信息的矩形指定为感兴趣区域,并 结合感兴趣区域设计了一个两层模型,结果节省了 3.15%的码率。文献[7]提出了时间视敏度(Visual Acuity, VA)模型, 在快速运动的区域, 使用更少的编 码系数,取得了降低编码码率的效果。虽然上述方 法均取得了不错的效果,然而仍然不够优越,都还有 待提升。为此,本文结合 Sobel 梯度算子和运动矢 量(Motion Vector, MV)检测感兴趣区域,并采用了 感兴趣区域分级策略,最终在基本保持视频质量的 同时达到了降低编码码率和时间的良好效果。

2 相关技术原理

2.1 运动矢量

运动矢量表示了当前帧与参考帧之间运动对象 的偏移量大小。HEVC标准是以块为基本单位分配 运动矢量,显然,这些运动矢量很好地记录了这些块 的运动特征。因此,可以通过判断该编码块的运动 矢量的强度来检测视频图像中的运动区域。图1给 出了 BasketballPass 序列第 18 帧的运动矢量分布 图。从运动矢量分布来看,具有较大运动矢量的区 域恰好是人眼感兴趣的运动区域,如图 1 中的篮球 运动员;而运动矢量较小甚至为零的区域正是人眼 关注度较低的静止背景区域,如图 1 中的墙壁和 地板。



图 1 BasketballPass(416×240)的第 18 帧 Fig. 1 The 18th frame of BasketballPass

2.2 边缘检测

在图像处理应用中,通常根据不同的应用需求 使用不同的边缘检测^[8]算子进行检测,包括 Sobel 算子^[9]、Krisch 算子、Roberts 算子、Canny 算子、 Log 算子、Laplace 算子等。图 2 (a)~(d)分别是 Laplacian、Krisch、Roberts 和 Sobel 算子在无噪声情 况下的检测结果,图 3(a)~(d)分别是各个算子加 入了高斯噪声后的检测结果,可以看出无噪声条件 下,检测效果都不错;但在有噪声的情况下,Sobel 算 子对噪声具有平滑作用,能够获取更为精确的边缘 信息。



图 2 九噪严情况下边缘检测结果 Fig. 2 The edge detection without noise



图 3 高斯噪声情况下边缘检测结果 Fig. 3 The edge detection with gaussian noise

3 感兴趣区域编码算法的提出

在感兴趣区域研究领域,大多数的研究人员只 对静止图像或者视频进行感兴趣区域的检测分析, 却很少将视频编码和感兴趣区域检测联系起来。结 合感兴趣区域的视频编码使编码器能够更加合理地 进行编码,从而提高视频编码器的压缩性能。在时 间域,视频图像的运动区域特别能够吸引人眼的注 意;在空间域,视频图像的边缘信息和纹理复杂区域 也能够极大程度地吸引眼球的关注。因此,本文把 运动区域和纹理复杂区域定义为感兴趣区域,采用 Sobel 算子检测纹理复杂区域,运动矢量检测运动区 域,通过调整量化参数(Quantization Parameter,QP) 优化感兴趣区域编码。

3.1 Sobel 算子检测感兴趣区域

Sobel 算子具有边缘检测效果好、对噪声有平滑 作用的优点,更重要的是其本身运算复杂度低,可节 省编码时间。如图 2 所示,Lena 图片中人眼最感兴 趣的头像区域被很好地检测出来。所以本文通过使 用 Sobel 算子获取视频图像中像素点的梯度信息来 检测纹理区域,最终实现感兴趣区域的检测。

HEVC 中以 CU 为单位进行编码,而在码率控制3个层次中以 LCU 层为最底层,故本文以 LCU 块为基本单位进行边缘检测。利用 Sobel 算子检测感兴趣区域步骤如下。

(1)利用 Sobel 算子统计一帧中每个 LCU 中像 素点的梯度 T₁,如式(1)所示:

$$T_1 = \sum_{j=0}^{63} \sum_{i=0}^{63} h(i,j)_{\circ}$$
(1)

式中:h(i,j)表示当前 LCU 中像素点f(i,j)的梯度值。

(2)以 LCU 为基本单位,统计当前帧中的平均 梯度 T₂,如式(2)所示:

$$T_{2} = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{H-1} \sum_{i=0}^{W-1} h(i,j) \, (2)$$

式中:H和W分别表示当前帧的高度和宽度;N为 当前帧中LCU的数目。

(3)图像中含有噪声点,所以不能把所检测出 包含有边缘像素点的 LCU 块简单地定义为边缘块。 因此需要设置阈值,当检测到编码块中像素点的数 目超过该阈值时,才判断该块为边缘块。通过 Sobel 算子检测到的梯度值定义感兴趣区域 *ROI*₁,如下式 所示:

$$ROI_{1} = \begin{cases} 1, T_{1} > \Gamma_{1} \\ 0, \pm \ell_{0} \end{cases}$$
(3)

式中: Γ₁ 为判定感兴趣区域的梯度阈值, 但是在视频图像中, 不同部分的纹理往往区别很大, 如果仅使用单一的阈值则必然导致检测结果的不准确。因此, 为了提高算法的鲁棒性, 采用当前帧中以 LCU 为基本单位的平均梯度 T, 作为阈值基准, 即

$$\Gamma_1 = \mu T_{2\circ} \tag{4}$$

式中:µ为阈值因子。

(4)根据当前帧中每一个 LCU 中的梯度 T_1 和 以 LCU 为基本单位的平均梯度 T_2 ,对其中的 LCU 块定义纹理因子 θ_1 :

$$\theta_1 = \frac{T_1}{T_2} \circ \tag{5}$$

(5)由于图像中相同大小块所包含的边缘像素 点数目是不相同的,则应设置不同级别的阈值来检 测边缘点,对应为不同的感兴趣级 *R*_{c1}:

$$R_{c1} = \begin{cases} 0, & \text{if } 0 \leq \theta_1 < \mu_1 \\ 1, & \text{if } \mu_1 \leq \theta_1 < \mu_2 \\ 2, & \text{if } \mu_2 \leq \theta_1 < \mu_3 \\ 3, & \text{if } \mu_3 \leq \theta_1 < \mu_4 \\ 4, & \text{if } \mu_4 \leq \theta_1 \end{cases}$$
(6)

式中: $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ 为阈值因子。将求取的平均梯度 作为阈值基准,根据视频不同的特性自适应调整感 兴趣级别的阈值。

3.2 运动矢量检测感兴趣区域

HEVC 进行运动估计后,每个 LCU 块会产生并 保存 256 个尺寸为 4×4 大小 CU 块的运动矢量,而 这些运动矢量可以很好地体现 LCU 块的运动特征。

· 40 ·

如图 1 所示,图片中人眼最感兴趣的篮球运动员被 很好地检测出来。因此,可以利用 HEVC 现有的运 动估计算法,通过编码块的运动矢量来判定感兴趣 区域,具体步骤如下。

(1)对于视频中的非 I 帧,以 LCU 为基本单元, 在运动估计之后,LCU 中保存着 256 个 4×4 大小的 CU 块运动矢量。考虑到 LCU 内 4×4 块运动矢量的 乱序性,为了把 CU 块的运动方向考虑在内,则取 256 个 CU 块运动矢量的平均值作为 LCU 块的运动 矢量。当前 LCU 的运动矢量如式(7)所示:

$$\boldsymbol{M}\boldsymbol{V}_{i} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sqrt{\boldsymbol{m}\boldsymbol{v}\boldsymbol{x}_{i}^{2} + \boldsymbol{m}\boldsymbol{v}\boldsymbol{y}_{j}^{2}}_{\circ} \qquad (7)$$

式中:N 为一个 LCU 中4×4 大小的 CU 块数量;mvx_i 和 mvy_i分别为当前 LCU 中第 i 个4×4 大小的 CU 块 运动矢量的水平分量和垂直分量。为简化计算过 程,减小复杂度,采用式(8):

$$\boldsymbol{M}\boldsymbol{V}_{i} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} |\boldsymbol{m}\boldsymbol{v}\boldsymbol{x}_{i} + \boldsymbol{m}\boldsymbol{v}\boldsymbol{y}_{j}|_{\circ}$$
(8)

(2)利用求取的 LCU 块的运动矢量定义感兴趣 区域 *ROI*₂, 如式(9) 所示:

$$ROI_2 = \begin{cases} 1, MV_1 > \Gamma_2 \\ 0, \pm \ell_0 \end{cases}$$
(9)

式中: Γ_2 为判定感兴趣区域的运动矢量阈值,但在 视频图像中,不同部分的运动程度是不一样的,如果 仅使用单一的阈值则必然导致检测结果误差较大。 因此,为了提高算法的鲁棒性,采用自适应的可变阈 值 Γ_2 :

$$\Gamma_2 = \lambda M V_{\text{avg}} \circ \tag{10}$$

式中:λ 为阈值因子;MV_{avg}计算公式为

$$\boldsymbol{M}\boldsymbol{V}_{\text{avg}} = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} \boldsymbol{M}\boldsymbol{V}_{i \circ}$$
(11)

式中:M代表前一帧中感兴趣 LCU 块的个数。

根据视频相邻帧间高度的时域相关性,本文将前一帧中所检测出的感兴趣区域 LCU 块的平均运动矢量信息 *MV*_{ave}作为阈值。

(3)根据当前 LCU 的运动矢量和前一帧感兴趣 LCU 的平均运动矢量,定义 LCU 块运动因子 θ,:

$$\theta_2 = \frac{MV_i}{MV_{\rm avg}}$$
(12)

(4) 对检测到的感兴趣区域进行分级:

$$R_{c2} = \begin{cases} 0, & \text{if } 0 \leq \theta_2 < \lambda_1 \\ 1, & \text{if } \lambda_1 \leq \theta_2 < \lambda_2 \\ 2, & \text{if } \lambda_2 \leq \theta_2 < \lambda_3 \\ 3, & \text{if } \lambda_3 \leq \theta_2 < \lambda_4 \\ 4, & \text{if } \lambda_4 \leq \theta_2 \end{cases}$$
(13)

式中: λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 为阈值因子。

3.3 具体算法流程

基于感兴趣区域的视频压缩编码流程如图 4 所示。对于检测到的感兴趣区域不改变原有的视频质量,即保持原有 HEVC 视频编码标准中的码率分配;而对于非感兴趣区域,则在没有失真严重的情况 下降低原有 HEVC 视频编码标准中的码率分配。



图 4 基于感兴趣区域的视频压缩编码框架 Fig. 4 The scheme of ROI-based video compression algorithm

结合 Sobel 算子的边缘检测和运动矢量两种方 法来检测感兴趣区域。对不同感兴趣程度的 LCU 根据 R_{c1}和 R_{c2}调整该 LCU 的量化参数。若检测到 该 LCU 块属于感兴趣区域时,则不改变该 LCU 块 的量化参数 QP;若检测到该 LCU 块为非感兴趣区 域时,则增大该 LCU 块的量化参数 QP,然后根据不 同的感兴趣级设定相对应的调整系数。量化参数 QP 的计算公式为

 $QP = QP + \Delta QP_1 + \Delta QP_2$ 。 (14) 式中: ΔQP_1 、 ΔQP_2 根据不同的感兴趣级别相应调 整。对 R_{c1} 从 0~4级, ΔQP_1 相应的值为 5、3、2、1、0; 对 R_{c2} 从 0~4级, ΔQP_2 相应的值为 5、4、3、1、0。

为了避免 LCU 块和周边块的 QP 差距过大而产 生方块效应,约束量化参数 QP 为

$$QP = \max\{\overline{QP} - 2, \min\{QP, \overline{QP} + 2\}\}_{\circ}$$
 (15)

式中: \overline{QP} 表示 LCU 块周围 4 个已编码 LCU 块 QP 的 平均值。同时为了确保编码质量的连续性,满足 QP 在 0 ~ 51 范围内的规定,则对 QP 进行进一步地 约束:

$$QP = \max\{0, \min\{QP, 51\}\}_{\circ}$$
 (16)

4 实验结果与算法性能分析

本文的实验平台为 HM13.0 标准测试模型。为 了体现算法的普适性,本实验从分辨率(416×240) 到(2560×1600)每个层次中选择了两个序列共10 个序列做测试,并与文献[7]的实验结果进行了对 比。采用的配置文件是 encoder_lowdelay_P_main. cfg,该配置文件图像组结构(GOP)为"IPPP"。初始 *QP* 设为 27,*QP* 设置得越大,视频的压缩率越大,同 时视频的质量也会降低。测试序列的实验平台的内 存为 4.00 GB, CPU 为 Intel(R)Core(TM) i5-3470 CPU @ 3.20 GHz。

首先,实验在码率、峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)和编码时间三个方面将本文算法 同 HM13.0 算法之间的性能进行比较。计算公式为

$$\Delta B = \frac{B_p - B_{\rm HM}}{B_{\rm HM}} \times 100\% , \qquad (17)$$

$$\Delta P = PSNR_p - PSNR_{\rm HM}, \qquad (18)$$

$$\Delta T = \frac{T_p - T_{\rm HM}}{T_{\rm HM}} \times 100\% \ (19)$$

式中: B_p 、 $PSNR_p$ 、 T_p 分别表示本文算法的编码码率、 PSNR 和编码时间; B_{HM} 、 $PSNR_{HM}$ 、 T_{HM} 分别表示 HM13.0标准的编码码率、PSNR 和编码时间; ΔB 表示本文算法与 HM13.0标准算法码率差值的百分 率; ΔP 表示本文算法与 HM13.0标准算法 PSNR 的 差值; ΔT 表示本文算法与 HM13.0标准算法编码时 间差值的百分率。为了保证视频中 I 帧的质量,继 而保持后续编码的视频质量。本文并未对视频 I 帧 采用提出的算法,只对视频 P 帧采用了提出的算 法,故本文也只对比 P 帧的编码性能。实验结果如 表1 所示。

rus. i me experimentui results				
视频类别	视频序列	$\Delta B / \%$	$\Delta T/\%$	$\Delta P/\mathrm{dB}$
416×240	BlowingBubbles	-12.51	-15.38	-0.78
416×240	BQSquare	-18.12	-12.29	-0.89
832×480	BQMall	-10.25	-7.98	-0.44
832×480	PartyScene	-9.43	-12.74	-0.80
1 280×720	Fourpeople	-10.71	-5.21	-0.19
1 280×720	Johnny	-13.83	-5.97	-0.18
1 920×1 080	ParkScene	-10.05	-13.42	-0.49
1 920×1 080	BQTerrace	-24.63	-14.62	-0.56
2 560×1 600	Traffic	-15.33	-10.55	-0.41
2 560×1 600	SteamLocomotive Train	-28.07	-15.66	-0.66
均值		-15.29	-11.38	-0.54

表1 实验结果比较 Tab 1 The experimental results

从表1中可以看出,本文算法的实验结果和采用HM13.0标准测试模型的实验结果相比,编码码率平均降低了15.29%,编码时间平均降低了11.38%,PSNR平均降低了0.54 dB。在所测试的序列中,可以发现PartyScene(832×480)序列码率降低相对比较少,只有9.43%。那是因为PartyScene 序 · 42 ·

列中运动区域和纹理复杂区域相对比较多,所占的 比例较大,压缩比则相应比较小。而 SteamLocomotiveTrain(2560×1600)序列的运动区域和纹理复杂 区域相对比较少,在视频中所占的比例相应比较小, 背景比较单一,压缩比就会相对更大。从表中也可 以看到, SteamLocomotiveTrain 序列降低了高达 28.07%的码率和15.66%的时间,也印证了本算法 的准确性和有效性。

然后,为了体现该算法的优越性,还将该算法与 文献[7]中的时间视敏度模型方法做了性能比较实 验,实验结果如图5所示。



从图 5 中可以直观地看到,本文算法比时间视 敏度模型算法能够节省更多的码率,性能更加优异。

另外,本文还利用客观结构相似视频质量评价 模型(Structural Similarity,SSIM)^[10-11]做了质量评价 实验,结果如表2所示。SSIM 的算法融合了人眼感 兴趣区域的视觉特性,使得此算法结果能够更好地 反应人的主观感受。

Tab. 2 The experimental results of SSIM				
视频类别	视频序列	SSIM		
416×240	BlowingBubbles	0.956 8		
416×240	BQSquare	0.982 6		
832×480	BQMall	0.989 2		
832×480	PartyScene	0.9804		
1 280×720	Fourpeople	0.998 0		
1 280×720	Johnny	0.9963		
1 920×1 080	ParkScene	0.995 8		
1 920×1 080	BQTerrace	0.9917		
	均值	0.9864		

从表2可看出,利用本文算法的解码视频与 HM13.0 算法的解码视频 SSIM 平均值高达 0.9864,充分证明了本算法的有效性。

5 结束语

由于 HEVC 标准中还没有利用到人眼视觉特 性,因此本文提出了一种基于感兴趣区域的 HEVC 压缩性能优化方法。利用 HVS 对纹理较复杂的区 域和运动区域有较强感知度的特性,把纹理复杂区 域和运动区域定义为感兴趣区域,并使用 Sobel 算 子结合运动矢量检测感兴趣区域:然后对所检测到 的感兴趣区域保持原有的量化标准,对非感兴趣区 域则调整量化参数,从而达到在不改变视频主观质 量的同时降低码率和时间的目的。从实验数据可以 明显地观察到,在保持了原有视频主观质量的同时, 码率平均降低了15.29%,时间平均降低了11.38%, 比采用时间视敏度模型性能更加优异,这也充分证 明了本算法的优越性。本文算法对视频具有普适 性,而实际中,可以针对某一专业领域,提出特定的 检测感兴趣区域的方法,再利用本文的算法,会取得 更加良好的效果。

参考文献:

- [1] ISO/IEC 23008-2, Information technology-high efficiency coding and media delivery in heterogeneous environments-Part 2: High efficiency video coding[S].
- [2] ITU-T Rec. H. 264 | ISO/IEC 14496-10, Advanced Video Coding for Generic Audiovisual Services [S].
- [3] HAN J H, MA Y. A robust infrared small target detection algorithm based on human visual system [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Society, 2014, 11(12):2168 -2172.
- [4] TSAPATSOULIS N, PATTICHIS C, RAPANTZIKOS K. Biologically inspired region of interest selection for lowbit rate video coding[C]//Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Image Processing. San Antonio, TX:IEEE,2007:333-336.
- [5] LIU Y, LI Z G, SOH Y C, et al. Conversational video communication of H. 264/AVC with region-of-interest concern[C]//Proceedings of 2006 IEEE International Conference on Image Processing. Atlanta, GA: IEEE, 2006: 3129-3132.
- [6] CHEN H, BRAECKMAN G, SATTI S M, et al. HEVCbased video coding with lossless region of interest for tele -medicine applications [C]//Proceedings of 2013 20th International Conference on Systems, Signals and Image Processing. Bucharest: IEEE, 2013:129-132.
- [7] ADZIC V. Perceptual methods for video coding[D]. Boca Raton, Florida: Florida Atlantic University, 2014.
- [8] 段瑞玲,李庆祥.图像边缘检测方法研究综述[J].光 学技术,2005,31(3):415-419.

DUAN Ruiling, LI Qingxiang. Summary of image edge detection[J]. Optical Technique, 2005, 31(3):415-419. (in Chinese)

- [9] 郑英娟. 基于八方向 Sobel 算子的边缘检测算法[J]. 计算机科学,2013,40(11):354-356.
 ZHENG Yingjuan. Edge detection algorithm based on the eight directions sobel operator [J]. Computer Science, 2013,40(11):354-356. (in Chinese)
- [10] WANG Z, BOVIK A C. Image quality assessment from error measurement to structural similarity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(1):1-14.
- [11] DAI W, AU O C, ZHU W J, et al. SSIM-based rate-distortion optimization in H. 264[C]//Proceedings of 2014
 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Florence: IEEE, 2014:7343-7347.

作者简介:



林国川(1988—),男,重庆万州人,2011 年于重庆邮电大学获学士学位,现为硕士研 究生,主要研究方向为图像与视频编码;

LIN Guochuan was born in Chongqing, in 1988. He received the B. S. degree from Chongqing University of Posts and Telecommunications in 2011. He is now a graduate student.

His research concerns image and video coding technologies.

Email:510970350@ qq. com

何小海(1964—),男,四川人,2002 年于四川大学获博 士学位,现为教授,主要研究方向为图像处理、模式识别和图 像通信;

HE Xiaohai was born in Sichuan Province, in 1964. He received the Ph. D. degree from Sichuan University in 2002. He is now a professor. His research interests include image processing, pattern recognition and image communication.

Email:hxh@ scu. edu. cn

李向群(1981—),男,河南人,2007 年于兰州理工大学 获硕士学位,现为博士研究生,主要研究方向为图像与视频 编解码;

LI Xiangqun was born in Henan Province, in 1981. He received the M. S. degree from Lanzhou Institute of Technology in 2007. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns image and video coding technologies.

于成业(1988—),男,河南人,2011 年于西南民族大学 获学士学位,2014 年于四川大学获硕士学位,主要研究方向 为图像与视频编解码。

YU Chengye was born in Henan Province, in 1988. He received the B. S. degree from Southwest University for Nationalities and the M. S degree from Sichuan University in 2011 and 2014, respectively. His research concerns image and video coding technologies.