

分布式视频解码器端的码率估计算法

封 颖, 李云松, 吴成柯, 宋 锐

(西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室, 陕西西安 710071)

摘 要: 比较了目前分布式视频系统的各种码率估计算法性能, 并提出了改进的码率估计算法. 本文算法位于解码器端, 利用边信息和差值分布的概率模型以及高位比特对编码比特平面的码率进行估计, 并将估计码率通过反馈信道传送到编码器. 实验结果表明, 本文算法估计每比特码率与理想情况估计值误差? 0.02 以内, 有效地提高了码率估计的精度, 从而降低了解码器的计算复杂度.

关键词: 分布式视频编码; 拉普拉斯分布; 码率估计

中图分类号: TN919.181 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 06-1232-05

Rate Estimation Algorithm for Distributed Video Coding on Decoder

FENG Ying, LI Yunsong, WU Chengke, SONG Rui

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

Abstract: With a comparison on a few of rate estimation algorithms, an improved methods resided in the decoder is proposed in this paper. The proposed method estimates the rate of each bitplane with the side information and the Laplacian distribution of difference between the source and the side information. Then, the result is transmitted to the encoder via a feedback channel. The experimental results show that the mean error of estimated rate is within 0.02 for each bit, as compared to that of the ideal rate estimation algorithm. With an efficient improvement on the precision of rate, the proposed method declines the computational complexity of the decoder.

Key words: distributed video coding; laplacian distribution; rate estimation

1 引言

传统的视频编码标准, 如 MPEG 系列和 H.26x 等, 均采用不对称编码方式, 即编码端隐含一个解码器. 这种编码方式适用于广播、流媒体点播等服务, 但是随着传感器网络和无线网络的发展, 出现了与传统编码标准相反的应用需求: 编码器由于受到成本、功耗等限制, 使其资源和能力有限, 而解码器拥有较多的资源可以进行复杂的计算. 分布式视频编码 DVC (Distributed Video Coding) 可以有效地满足上述应用需求, 其主要在解码端利用信号统计特性, 在满足压缩能力的同时, 极大地减轻了编码器的复杂度. 20 世纪 70 年代, Slepian 和 Wolf 建立了分布式无损编码理论^[1], 以此为基础 Wyner 和 Ziv 建立了有损分布式编码理论^[2], 这两个理论奠定了 DVC 的理论基础. 后续的研究者发现了分布式信源编码和信道编码的密切关系, 把信道码的研究结果应用到分布式信源编码中^[3], 有力地推动了 DVC 的发展.

2 相关工作

目前 DVC 的研究大多数都以伯克利大学的 PRISM 方案^[4]和斯坦福大学研究小组的帧内编码帧间解码方案^[5]为基础. 码率估计是分布式视频编解码系统的重要组成部分, 其对系统的复杂度有很大的影响. 编码信息和边信息之间的熵决定了编码比特平面在解码端无损重构的最低码率即最佳码率. 在最初的 DVC 中, 最佳码率由编、解码器经反馈信道进行多次交互和循环解码获得. 虽然该方法可达到最高的编码效率, 但是过多的交互不但增加反馈信道负担, 也使得解码延时增大. 文献 [6] 和文献 [7] 是针对无反馈信道 DVC 设计的码率估计算法. 文献 [6] 在编码端利用概率模型对编码比特平面的码率进行估计. 文献 [7] 在编码端采用低复杂度运动估计算法生成退化的边信息, 由边信息和编码帧对编码比特平面的码率进行估计. 文献 [8] 采用编码器和解码器混和码率控制算法, 在编码端利用编码帧和差值分布

概率模型估计最低码率, 通过循环解码得到最佳码率。虽然上述算法对比特平面的码率进行了估计, 但还存在一定的问题: 文献[6]算法基于编码像素在[0, 255]之间服从均匀分布的假设, 但是多数的图像序列并不满足该要求。而且其比特平面不相关的假设使估计值与最佳码率有较大的偏差, 降低了系统的性能。文献[7]采用先验概率进行码率估计, 该算法的估计码率与真实值并不吻合, 而且该算法在编码端引入运动估计在一定程度上降低 DVC 具有的低复杂度编码器的优势。文献[8]在编码端利用编码帧和编码帧与边信息差值的概率模型来估计最低的码率, 但是该算法得到的码率并不精确, 还要通过多次的交互才能得到最佳码率。综合上述算法的优缺点, 本文提出了改进的码率估计算法, 该算法由解码端利用已解码的高位比特和边信息以及差值概率模型来估计最低码率, 并通过反馈信道传送到编码器。

3 WZ 视频编解码的码率估计算法

3.1 系统框架与编解码过程

本文使用的编码框架如图 1 所示。该系统包括: 无损的 SW 编解码器(基于累积的 LDPC 码^[9]), DCT 变换和反变换模块, 标量量化模块, 变换系数重构模块, 反馈信道, 以及边信息插值模块。

输入序列被分为关键帧 K 和 WZ 帧两个子列。对于 K 帧, 采用 H.264 帧内编解码。对于 WZ 帧, 首先要进行 4@DCT 变换, 然后将变换系数按照在变换块中的位置分为 16 个子带, 分别对应于直流系数 DC, 交流系数 $AC_0, AC_1, \dots, AC_{14}$ 。对于每个子带, 进行标量量化, 量化系数按照从高到低提取所有的比特平面, 送入 LDPC 编码器。SW 编码器输出编码的伴随式比特分为多个数据段存于缓存区中, 并根据解码需要依次发送给解码器。在解码器端, 对关键帧进行运动估计和补偿产生 WZ 帧的插值帧, 由插值帧通过 DCT 变换产生 SW 解码器所需要的边信息 Y。解码器设定比特平面误码率的上限为 P_{eT} , 信道码解码器根据边信息和接收到的信息比特, 进行循环解码。如果当前比特平面解码的误比特率 $P_e >$

P_{eT} , 则解码器通过反馈信息告知编码器, 编码器再发送一段数据, 再次进行解码, 如此循环, 直到满足 $P_e < P_{eT}$ 。当解码所有的比特平面, 即可进行子带变换系数重构, 最后进行 IDCT 变换, 输出重构帧。

3.1.2 DCT 域比特平面的码率估计

目前 DVC 采用比特平面的编码方式, 编码比特平面最佳码率由条件熵 $H(X|Y)$ 决定。设长度为 N 的比特平面 $B^N = (B_0, B_1, \dots, B_{N-2}, B_{N-1})$ 为原信息, 而 $B^N = (B_0^c, B_1^c, \dots, B_{N-2}^c, B_{N-1}^c)$ 为边信息, 两者之间的熵为

$$H(B^N|B^{cN}) = -P_{\text{cross}} \# \log P_{\text{cross}} - (1 - P_{\text{cross}}) \# \log (1 - P_{\text{cross}}) \quad (1)$$

式中 P_{cross} 为 B^N 和 B^{cN} 之间的交叉概率。若已知 B^N 和 B^{cN} , 可用下式来估计 P_{cross} 值,

$$P_{\text{cross}} = E(P_n) = \frac{1}{N} E_n P_n \cup \frac{1}{N} E_n T_n \begin{cases} T_n = 1, \text{ 如 } B_n \times B_n^c \\ T_n = 0, \text{ 如 } B_n = B_n^c \end{cases} \quad (2)$$

式中 P_n 为 B_n 和 B_n^c 的交叉概率。

然而, 在 DVC 中 X 和 Y 不可能同时出现在编码器端或解码器端。在编码器端, 只知 X 和 $X \oplus Y$ 服从拉普拉斯分布。设 $X^N = \{x_0, x_1, \dots, x_{N-1}\}$ 为原信息, 共有 K 个比特平面, B^N 为其第 k 个比特平面, x_n 在 k 个比特平面的值为 B_n 。设 $y_n \in [-1, +1]$, 且其位于比特平面 k 的值为 $1 - B_n$ (y_n 位于 2^{K-k-1} 个大小为 2^k 的分段区间), 则通过下式估计比特平面 k 的交叉概率

$$P_{\text{cross}} = \frac{1}{N} E_n E_m Q_2^{\frac{A}{2}} \# e^{-A|y - x_n|} dy \quad (3)$$

同理, 在解码端已知 Y 和 $X \oplus Y$ 服从拉普拉斯分布。假设解码的各比特平面不相关, 则对于各比特平面, 可以得到与式(3)相似的式(4)

$$P_{\text{cross}} = \frac{1}{N} E_n E_m Q_2^{\frac{A}{2}} \# e^{-A|x - y_n|} dx \quad (4)$$

比较式(3)和式(4), 可以发现: 当边信息的质量较高时, 在解码端各比特平面相互独立的假设下, 交叉概率的估计值与编码端得到结果大致相同。设 X^N 有 K 个

比特平面, B_k^N 为其第 k 个比特平面, 则解码比特平面不相关的情况下, 估计得到各比特平面的熵总计为

$$H_1 = H(B_0^N|Y^N) + H(B_1^N|Y^N) + \dots + H(B_{K-1}^N|Y^N) \quad (5)$$

而实际上在解码第 k 个比特平面时, 已经解码的高位比特使得 x_n 可能处于

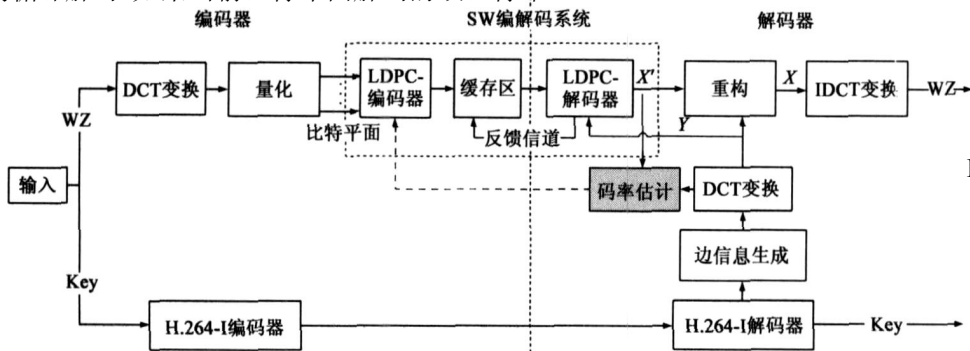


图1 分布式视频编解码框架图

的范围缩小. 因此在解码比特平面相关的情况下, 则所有比特平面熵的和为

$$H_2 = H(B_0^N | Y^N) + \dots + H(B_k^N | Y^N, B_0^N, \dots, B_{k-1}^N) + \dots + H(B_{K-1}^N | Y^N, B_0^N, \dots, B_{K-2}^N) \quad (6)$$

由于条件熵小于等于非条件熵, 所以 $H_1 \geq H_2$, 并且在解码端进行码率估计比编码端更为准确.

3.1.3 解码端比特平面的码率估计

在 DVC 中 X 和 Y 不可能同时出现在编码器端或解码器端, 所以难以实现通过式(2)直接估计各比特平面码率. 本文算法在解码端对比特平面码率进行估计, 对于最高位比特平面, 已知信息只有 Y , 而对于其他的比特平面, 可用的信息为 Y 和已经解码的高位比特平面.

在 DCT 域, 编码图像和边信息的差值服从拉普拉斯分布. 设编码图像 DCT 变换系数为 X , 在已知边信息 Y 的情况下, X 必然服从以下分布:

$$f_{X|Y}(x) = \frac{\lambda}{2} e^{-\lambda |x - Y|} \quad (7)$$

设子带长度为 N , 则比特平面的比特长度也为 N . 设 x_n 为子带中第 n 个系数, 对应的边信息为 y_n . 子带比特平面数为 K , 最高比特平面记为 B_{K-1} , 其余比特平面依次记为 $B_{K-2}, B_{K-3}, \dots, B_k, \dots, B_1, B_0$. 设 b_n^k 为 x_n 在第 k 个比特平面值, b_n^k 可能为 0 也可能为 1, 需要由高位比特平面和边信息进行先验概率估计. 即对于第 k 个比特平面, 已知 $b_n^{K-1}, b_n^{K-2}, \dots, b_n^{k+1}$ 和边信息 Y 来确定 $P(b_n^k = 0 | Y, b_n^{K-1}, b_n^{K-2}, \dots, b_n^{k+1})$ 与 $P(b_n^k = 1 | Y, b_n^{K-1}, b_n^{K-2}, \dots, b_n^{k+1})$.

设 $X_n^{k+1} = b_n^{K-1} @ 2^{K-1} + b_n^{K-2} @ 2^{K-2} + \dots + b_n^{k+1} @ 2^{k+1}$, X_n^{k+1} 为由高位比特确定 x_n 可能所在区间的下限, 则

$$P(b_n^k = H | Y, b_n^{K-1}, b_n^{K-2}, \dots, b_n^{k+1}) = P(b_n^k = H | y_n, X_n^{k+1}) \quad H = 0 \text{ 或 } 1 \quad (8)$$

由上式可知

$$\begin{cases} X_n^k = X_n^{k+1}, & \text{若 } b_n^k = 0 \\ X_n^k = X_n^{k+1} + 2^k, & \text{若 } b_n^k = 1 \end{cases} \quad (9)$$

根据贝叶斯公式

$$P(b_n^k = H | y_n, X_n^{k+1}) = \frac{P(b_n^k = H | X_n^{k+1} | y_n)}{P(X_n^{k+1} | y_n)} = \frac{P(X_n^k | y_n)}{P(X_n^{k+1} | y_n)} \quad H = 0 \text{ 或 } 1 \quad (10)$$

从而式(8)转化为

$$P(b_n^k = H | y_n, X_n^{k+1}) = \frac{P(X_n^k(H) | y_n)}{P(X_n^{k+1} | y_n)}, \quad H = 0 \text{ 或 } 1 \quad (11)$$

对于 x_n , 除了 b_n^k 外, 还有 $b_n^{K-1}, b_n^{K-2}, \dots, b_n^0$ 共 k 个比特未知, 所以 x_n 在以下的范围之内 ($b_n^{K-1} b_n^{K-2}, \dots, b_n^1, 0, \dots, 00$) $\sim$ ($b_n^{K-1} b_n^{K-2}, \dots, b_n^1, 1, \dots, 11$). 设 X_L

和 X_U 为 x_n 所在区间上限和下限,

$$\begin{cases} X_L = b_n^{K-1} @ 2^{K-1} + b_n^{K-2} @ 2^{K-2} + \dots + b_n^k @ 2^k \\ \quad + 0 @ 2^{k-1} + 0 @ 2^{k-2} + \dots + 0 @ 2^0 = X_n^k \\ X_U = b_n^{K-1} @ 2^{K-1} + b_n^{K-2} @ 2^{K-2} + \dots + b_n^k @ 2^k \\ \quad + 1 @ 2^{k-1} + 1 @ 2^{k-2} + \dots + 1 @ 2^0 = X_n^k + 2^{k-1} \end{cases} \quad (12)$$

当 $b_n^k = 0$, $X_L = X_n^{k+1}$ 和 $X_U = X_n^{k+1} + 2^{k-1}$. 而 $b_n^k = 1$, $X_L = X_n^{k+1} + 2^k$ 和 $X_U = X_n^{k+1} + 2^{k+1} - 1$. 因为 $x_n \in [X_L, X_U]$, $P(X_n^k | y_n)$ 可以通过下式计算

$$P(X_n^k | y_n) = \int_{X_L}^{X_U} P(t | y_n) dt \quad (13)$$

本文系统采用标量量化, 设量化间隔为 Δ , 则 x_n 量化前位区间于 $[(X_L - 0.5) @ \Delta, (X_U + 0.5) @ \Delta]$ 内, 所以

$$\begin{aligned} \int_{X_L}^{X_U} P(t | y_n) dt &= \int_{(X_L - 0.5) @ \Delta}^{(X_U + 0.5) @ \Delta} f_{X|Y}(x) dx \\ &= \int_{(X_L - 0.5) @ \Delta}^{(X_U + 0.5) @ \Delta} \frac{\lambda}{2} e^{-\lambda |x - y_n|} dx \quad (14) \end{aligned}$$

上式通过积分可得

$$\begin{cases} 0.5 @ e^{-\lambda y_n} (e^{-\lambda @ (X_L - 0.5) @ \Delta} - e^{-\lambda @ (X_U + 0.5) @ \Delta}), \\ \quad \text{若 } (X_L - 0.5) @ \Delta \leq y_n \\ 0.5 @ e^{-\lambda y_n} (e^{-\lambda @ (X_U + 0.5) @ \Delta} - e^{-\lambda @ (X_L - 0.5) @ \Delta}), \\ \quad \text{若 } (X_U + 0.5) @ \Delta \leq y_n \\ 1 - 0.5 @ (e^{-\lambda @ [(X_L - 0.5) @ \Delta - y_n]} + e^{-\lambda @ [y_n - (X_U + 0.5) @ \Delta]}), \\ \quad \text{若 } (X_L - 0.5) @ \Delta < y_n < (X_U + 0.5) @ \Delta \end{cases} \quad (15)$$

对于比特平面 k , $P(X_n^k | y_n)$ 可由式(15)确定. 而已知 $b_n^{k+1} = A$ ($A = 0$ 或 1), 则 $P(X_n^{k+1} | y_n)$ 由下式确定,

$$P(X_n^{k+1} | y_n) = P(b_n^{k+1} = A | y_n, b_n^{K-1}, b_n^{K-2}, \dots, b_n^{k+2}) \quad (16)$$

从而由式(10)可以得到 b_n^k 为 0 和 1 的先验概率. 对于码率较高的比特平面, 如 DC 分量的低位比特平面和 AC 分量的符号位比特平面, 使用下式对先验概率进行判决, 可以有效地提高码率估计的准确性.

$$P(b_n^k = H | y_n, X_n^{k+1}) = \frac{P(b_n^k = H | y_n, X_n^{k+1})}{T_p} \quad T_p \in (0.5, 1) \quad (17)$$

式中 T_p 为判决门限, 且经验值为 0.8. 从而得到解码端比特平面 k 的交叉概率

$$P_n \cup \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N T_n, \quad T_n = \begin{cases} P(b_n^k = 0 | y_n, b_n^{K-1}, b_n^{K-2}, \dots, b_n^{k+1}), & \text{若 } b_n^k = 1 \\ P(b_n^k = 1 | y_n, b_n^{K-1}, b_n^{K-2}, \dots, b_n^{k+1}), & \text{若 } b_n^k = 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中 b_n^k 为 y_n 在比特平面 k 上值. 由 P_n 通过式(1)可以得到当前比特平面的一个比特在解码端无损重构所需

要的最少信息量即最低码率 $R_{\min}$. 对于整个比特平面, 其无损重构所需传输的比特数为 $R_{\min} @N$.

4 实验结果与分析

以 3.1 所述编码框架为实验软件平台, 使用 3 个典型图像序列 Hall、News 和 Foreman 各 101 帧进行实验研究. 图像格式为 CIF, 图像序列的帧频为 30fps, 关键帧 K 帧与 WZ 帧的比例为 1B1. 关键帧 K 采用 H1264/AVC 帧内预测编码^[10], 设置不同的量化参数使得关键帧的重构质量与 WZ 帧相仿. 通过对相邻 K 帧运动估计, 内插产生边信息帧^[11]. SW 系统采用累积 LDPC 码, 检验结点个度为 3, 码长为 6336. 实验只统计 WZ 帧重构图像的亮度分量的 PSNR.

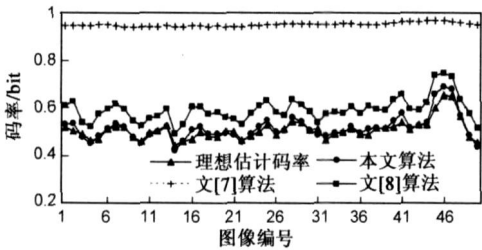


图2 Foreman序列DC分量的平均码率比较

图2为Foreman序列DC分量在解码端无损解码最低码率估计结果比较. 测试50帧图像, DC分量采用64级标量量化, 共有6个比特平面.

从上图可以看出, 文献[7]算法码率与实际码率的差距很大, 所以先验概率不能直接进行码率估计. 文献[8]算法估计码率与理想码率估计比较接近, 其平均误差161.37%. 而与文献[8]算法相比较, 本文算法估计DC平均码率更为精确, 其与理想情况下的码率平均误差在11.31%.

表1 图像序列6个子带的平均码率估计比较

图像序列		子带索引					
		DC	AC ₀	AC ₁	AC ₂	AC ₃	AC ₄
Hall	理想码率	0.3268	0.1931	0.1589	0.082	0.0826	0.1563
	文献[8]算法	0.4313	0.2435	0.1794	0.0662	0.0716	0.1681
	本文算法	0.3358	0.2195	0.1611	0.0676	0.0787	0.1502
News	理想码率	0.3432	0.1714	0.1764	0.1034	0.0995	0.0995
	文献[8]算法	0.4578	0.2255	0.2071	0.0821	0.0822	0.0852
	本文算法	0.3559	0.1901	0.1841	0.0827	0.0875	0.0875
Foreman	理想码率	0.5073	0.2475	0.338	0.1849	0.2154	0.1419
	文献[8]算法	0.5917	0.2537	0.365	0.2041	0.1992	0.1067
	本文算法	0.5139	0.2366	0.3511	0.1736	0.1982	0.1051

表1给出了3个测试序列不同频率子带的平均码率, 测试条件如上所述, 共编码10个子带, 其余子带在重构时由边信息填充. 关键帧平均PSNR与WZ帧重构PSNR相似, 分别为38.112dB、37.191dB和35.176dB.

从表1可以看出, 对于Hall和News序列前3个子带, 本文算法明显优于文献[8]算法. 对于高频交流子

带, 符号位为最高比特平面, 如3.1.2节所述, 本文算法和文献[8]算法对该比特平面估计结果相同. 由于符号位比特平面码率远高于低位比特平面码率, 所以两种算法估计子带码率的均值接近. 对于Foreman序列, DC子带的码率如图2所示, 两种算法对AC₃和AC₄子带的估计码率几乎相同. 而对AC₀、AC₁和AC₂, 本文算法与理想码率估计误差在0.0102之间, 而文献[8]算法与理想码率估计误差在0.0103之间, 所以本文算法更为精确.

5 结论

基于分布式视频编码系统码率估计的特点, 本文对目前已有的码率估计算法的性能进行了分析比较, 提出了改进的解码端码率估计算法. 本文算法在进行码率估计时充分利用了解码的高位比特平面信息来提高估计码率的精度. 实验结果表明, 与已有算法相比, 本文算法在不增加解码复杂度的情况下, 能有效地提高编码比特平面码率估计的精度. 本文算法针对存在反馈信道的系统, 而对于单向DVC系统, 该算法并不适用, 需要作进一步的研究.

参考文献:

[1] J Slepian, J Wolf. Noiseless coding of correlated information sources[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1973, 19(4): 471- 480.

[2] A Wyner, J Ziv. The rate-distortion functions for source coding with side information at the decoder[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1976, 22(1): 1- 10.

[3] S Pradhan, K Ramchandran. Distributed source coding using syndromes (DISCUS): design and construction [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(2): 626- 643.

[4] R Puri, K Ramchandran. PRISM: a / reversed0 multimedia coding paradigm [A]. Proc of 2003 IEEE International Conference on Image Processing [C]. Barcelona: IEEE, 2003. 2617- 20.

[5] Bernd Girod, Anne Aaron, Shantanu Rane, et al. Distributed video coding [J]. IEEE Special Issue on Advances in Video Coding and Delivery, 2005, 93(1): 71- 83.

[6] Morbee M, Pradeeb Nebot J, Pizurica, et al. Rate allocation algorithm for pixel domain for distributed video coding without feedback channel [A]. Proc of 2007 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing [C]. Hawaii: IEEE, 2007. 2521- 2524.

[7] C Brites, F Pereira. Encoder rate control for transform domain Wyne2Ziv coding [A]. Proc of 2007 IEEE International Conference on Image Processing [C]. San Antonio, Texas: IEEE, 2007. 2: 225- 228.

[8] Kubasov D, Lajnef K, Guillemot C. A hybrid encoder/ decoder rate control for Wyne2Ziv video coding with a feedback chan2

- nel[A]. Proc. of 2007 IEEE International Workshop on Multimedia Signal Processing[C]. Chania, Greece: IEEE, 2007. 251 - 254.
- [9] David Varodayan, Anne Aaron, Bernd Girod. Rate2adaptive distributed source coding using low2density parity2check codes [A]. Proc of 2005 Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers[C]. Grove, California: IEEE, 2005. 1203 - 1207.
- [10] Karsten S hring. JVT reference software version JM9. 6 [EB/OL]. <http://iphone.hhi.de/suehring/tml/download/>
- [11] J Ascenso, C Brites. Motion compensated refinement for low complexity pixel based distributed video coding[A]. Proc of 2007 IEEE International Conference on Advanced Video and Signal based Surveillance[C]. Como, Italy: IEEE, 2007. 593-598.

作者简介:



封颖 男, 1981 年生于江苏连云港, 西安电子科技大学博士研究生, 研究方向为视频压缩编码及传输, 分布式视频编码。

Email: fengying.xidian@gmail.com



李云松 男, 1974 年生于辽宁葫芦岛, 西安电子科技大学副教授、博士。西安电子科技大学通信与信息系统学术带头人, 通信与信息系统硕士生导师、陕西省图形图像学会理事。分别于 1996 年和 1999 年在西安电子科技大学获得图像传输与处理专业学士和硕士学位, 并于 2002 年 12 月在西安电子科技大学获得信号与信息处理专业博士学位。主要从事图像/视频压缩编解码

以及网络视频传输方面的研究工作。Email: ysl@mail.xidian.edu.cn