

基于时空联合的解码边信息插值算法

王凤琴*, 陈晓雷, 陈 燕

(郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院, 郑州 450002)

(*通信作者电子邮箱 wfqin126@126.com)

摘 要:在 Wyner-Ziv 视频编码中, 边信息质量是影响系统编码效率的关键因素, 但解码端获得的运动矢量不精确而导致内插边信息的质量不高。为此, 提出一种基于时空联合的解码边信息插值算法。该算法将多种块分割模式与双向运动估计相结合, 匹配准则采用双向平均绝对误差和 (SBAD) 判断运动矢量时间变化, 利用边界绝对误差 (BAD) 判断运动矢量的空间变化, 通过时空联合匹配准则保证运动矢量的空间平滑性和时间连贯性。实验结果表明, 该算法降低了编码码率, 内插边信息的主观和客观质量均有所提高, 边信息的峰值信噪比 (PSNR) 最大提高 1.41 dB。

关键词:分布式视频编码; Wyner-Ziv 编码; 运动估计; 边信息; 帧内插

中图分类号: TN919.81 **文献标志码:** A

Side information interpolation algorithm based on spatio-temporal correlations at decoder

WANG Feng-qin*, CHEN Xiao-lei, CHEN Yan

(School of Computer and Communication Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou Henan 450002, China)

Abstract: In Wyner-Ziv video coding, the coding efficiency depends mainly on the quality of side information. However, the poor motion vector, which is obtained from motion estimation at decoder, will result in quality degradation of the side information. To improve the performance of Wyner-Ziv video coding, a side information interpolation algorithm was proposed, which applied multi-macroblock partition modes technology to bi-directional motion estimation. Sum of Bilateral Absolute Difference (SBAD) was utilized to measure the temporal continuity of motion vector, and Boundary Absolute Difference (BAD) was used to measure the spatial continuity of motion vector, and spatio-temporal matching criterion was applied to find the optimal motion vector. The simulation results show that the proposed algorithm can maximally achieve 1.41 dB improvement in the Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) of side information with reducing coding bit rate.

Key words: Distributed Video Coding (DVC); Wyner-Ziv coding; motion estimation; side information; frame interpolation

0 引言

分布式视频编码 (Distribute Video Coding, DVC) 是基于 Slepian-Wolf^[1] 和 Wyner-Ziv^[2] 两大信息理论结果的一种新型编码结构, Wyner-Ziv (WZ) 视频编码是一种典型的 DVC 系统, 它在解码端充分利用信源的统计特性进行有效压缩, 是目前图像通信领域一个研究热点。与传统的视频编码 (H. 263, H. 264/AVC 等) 相比, 它具有编码简单、解码复杂、鲁棒性较强等特点, 且能够实现较高效率的压缩, 适合计算能力和内存容量都受限的无线视频终端。

在 WZ 视频编码系统中, 为了解码当前 WZ 帧, 在解码端利用相邻已解码关键帧信息对编码 WZ 帧的信息进行估计, 得到的关于原编码 WZ 帧的相关信息称为边信息 (side information)。边信息是对 WZ 帧的估计, 在 DVC 中起着至关重要的作用。重建边信息越精确, 所需要传输 WZ 的码流越小, 解码后的 WZ 帧质量越好。目前, 解码边信息构造方法主要采用运动补偿帧外推技术^[3-4] 和运动补偿帧内插技术^[5-12]。为了提高内插边信息的质量, 相关学者从像素精度^[5]、块分割模式^[6] 等方面进行研究以获取当前内插块的最

佳运动矢量, 并采用空间平滑滤波^[7-8]、运动恢复^[9]、运动补偿^[10-12] 等技术提高内插边信息的质量。另外, 文献 [13] 针对低延时 DVC 系统采用一种自回归模型的方案提高边信息质量。文献 [14] 对图像组结构进行研究, 提出了一种自适应图像组结构方案提高边信息质量。

本文研究解码边信息的构造技术, 提出了一种基于时空联合的解码边信息插值算法。通过多模式块分割方式、时空联合匹配准则、空间平滑等多种策略以保证获取当前内插块的最佳运动矢量, 并根据运动补偿块的时间相关性采用不同权重值进行帧内插, 有效提高了内插边信息的质量。

1 WZ 视频编码系统

WZ 视频编码系统框图如图 1 所示。WZ 视频编码把视频序列的帧分为两种类型: 关键帧和 WZ 帧, 关键帧采用传统的帧内编解码方法, WZ 帧采用帧内编码帧间解码方法。对 WZ 帧, 编码端对 WZ 帧进行 4×4 离散余弦变换 (Discrete Cosine Transform, DCT), 变换后的系数按位置分组得到频带组 X_k (k 表示系数号), 对每组系数带 X_k 采用 2^{M_k} 级别统一尺

收稿日期: 2012-02-01; 修回日期: 2012-03-28。

基金项目: 河南省教育厅自然科学基金资助项目 (2009A510015); 郑州轻工业学院博士基金资助项目 (2011BSJJ001)。

作者简介: 王凤琴 (1980 -), 女, 河南开封人, 讲师, 博士, 主要研究方向: 视频压缩、分布式视频编码; 陈晓雷 (1964 -), 男, 河南郑州人, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向: 图像处理、嵌入式系统; 陈燕 (1979 -), 女, 河南南阳人, 助教, 硕士, 主要研究方向: 图像处理、嵌入式系统。

度量化,量化后的符号流进行位平面提取形成 M_k 个位平面矢量,然后再对每个位平面进行独立编码。解码端对边信息 Y 进行同样块大小的 DCT,然后对变换后的系数进行分组形成 Y_k ,利用 Y_k 进行 Slepian-Wolf 解码和重建 WZ 帧。对给定的频带系数进行解码,首先解码最重要的位平面,利用奇偶校验

位和相应的边信息解码当前位平面,如果解码失败,通过反馈信道要求编码端传输附加奇偶校验位,直到成功解码。当解码完所有位平面后,对解码符号流重组,利用解码符号流 q' 和边信息 Y_k 重建系数带 X'^{DCT} ,最后对重建后的 X'^{DCT} 进行逆离散余弦变换 (Inverse DCT, IDCT) 得到解码后的 WZ 帧。

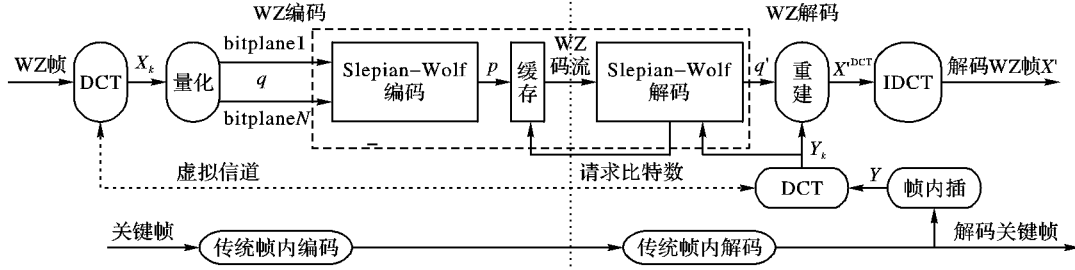


图1 WZ 视频编码结构

WZ 视频编码的编码效率很大程度上依赖于边信息的估计质量。边信息是解码器所能得到的关于编码帧的信息。在解码端,边信息一方面用于 Slepian-Wolf 解码,边信息质量越精确说明越接近原始编码 WZ 帧数据,解码只需要从编码端获取较少的奇偶校验位,对同样解码质量的视频需要传输的码流就越少;另一方面,在解码重建模块,当边信息在量化间隔之内时,将边信息作为量化重构值,因此边信息越精确,量化重构值越接近原始信息。

在解码端可以采用以下几种技术产生边信息,最简单的帧内插方法是直接采用前向解码关键帧作为边信息,或采用线性内插用相邻解码关键帧位于同一位置相对应像素的简单平均获得边信息。然而对于中等和大运动的视频序列,采用这些方法产生的边信息质量比较差。目前边信息主要采用运动补偿帧内插技术产生,在解码端经过运动估计和运动矢量的细化处理后获得当前内插块的最佳运动矢量 $mv = (mv_x, mv_y)$,然后利用传统视频编码中的双向运动补偿技术获得内插边信息。

$$Y(x, y) = \frac{1}{2} X_b(x + mv_x, y + mv_y) + \frac{1}{2} X_f(x - mv_x, y - mv_y) \quad (1)$$

2 基于时空联合的边信息插值算法

2.1 双向运动估计

基于块匹配的单向运动估计得到运动矢量,运动补偿帧内插时会出现叠补或漏补现象。为了解决这个问题,采用双向运动估计获得帧内插块的最佳运动矢量。首先将内插帧划分为块,每个块有两个运动矢量,一个指向前向相邻关键帧,一个指向后向相邻关键帧,边信息帧中的像素利用这两个运动矢量进行内插获得。如图2所示, B 表示内插帧的一个块,可以假设其运动矢量在搜索范围 S 内。对此范围内的每一个候选运动矢量 V ,按一定的准则计算该块在前帧中移动 $+V$ 后和在后帧移动 $-V$ 后对应块每个像素的差值,在 S 内搜索到差值最小的 V 即为该块的运动矢量估计值;然后进行运动补偿就可以获得内插边信息。双向运动估计可以有效克服单向运动估计时的叠补和漏补现象。

2.2 时空联合匹配准则

传统视频编码中的运动估计和补偿是在编码端已知当前帧和参考帧的情况下利用率失真优化 (Rate Distortion Optimization, RDO) 策略来选取当前块的最佳运动矢量。DVC 中运动估计在解码端执行,用于产生边信息,边信息是对当前解码帧的估计,它在解码端不知当前解码帧信息情况下获得,只采用相邻解码关键帧的信息对当前解码 WZ 帧进

行估计,在运动矢量和宏块分割模式判决时,与运动信息的编码比特无关,失真函数只与原始数据和预测值之间的差值有关。为了衡量当前帧与参考帧中两个图像块之间的相似程度,考虑到时间连贯和空间平滑,块匹配评价准则采用时间空间联合准则 $J(B, \Delta x', \Delta y')$,最佳匹配块通过寻找最小 $J(B, \Delta x', \Delta y')$ 获得。

$$(\Delta x, \Delta y) = \arg \min J(B, \Delta x', \Delta y'); \quad \Delta x' = [-S, S], \Delta y' = [-S, S] \quad (2)$$

$$J(B, \Delta x', \Delta y') = \beta D_T(B, \Delta x', \Delta y') + (1 - \beta) D_s(B, \Delta x', \Delta y') \quad (3)$$

其中, S 为搜索范围; $(\Delta x, \Delta y)$ 是估计到的内插像素 (x, y) 的运动矢量; $D_T(B, \Delta x', \Delta y')$ 用于判断所选运动矢量时间变化; $D_s(B, \Delta x', \Delta y')$ 用于判断所选运动矢量的空间连贯性; β 是权重因子,为了避免物体边界造成误判断,可将时间变化的权重值取得大些,实验发现 β 取 0.8 可以获得较好的效果。

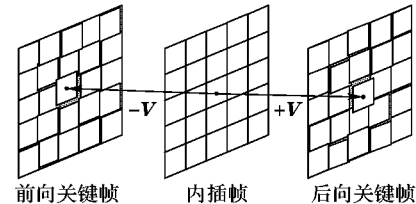


图2 双向运动估计原理

$D_T(B, \Delta x', \Delta y')$ 采用双向平均绝对误差和 (Sum of Bilateral Absolute Difference, SBAD) 作为判断块运动矢量时间变化,其值越小说明所选运动矢量的时间连续性越好。

$$D_T(B, \Delta x', \Delta y') = \frac{1}{M \times N_{(x, y \in B)}} \sum |X_f(x - \Delta x', y - \Delta y') - X_b(x + \Delta x', y + \Delta y')| \quad (4)$$

若块内有像素强度变化时,仅采用 SBAD 选取的运动矢量,运动补偿后空间平滑性差,当边界值相差较大时,会产生明显的块效应。为了测量所选运动矢量运动补偿后的空间平滑性,可以利用当前内插边信息块与其邻近已内插的边信息块边界误差进行判断。 $D_s(B, \Delta x', \Delta y')$ 采用当前块与邻近已内插出边界块的边界绝对误差 (Boundary Absolute Difference, BAD) 进行判断,以最大限度减少内插帧中当前块与其边界块的失真,其值越小空间相关连贯性越好。

$$D_s(B, \Delta x', \Delta y') = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} \left| \frac{1}{2} X_b(i + x - \Delta x', y - \Delta y') + \frac{1}{2} X_f(i + x + \Delta x', y + \Delta y') - Y(i + x, y - 1) \right| + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N-1} \left| \frac{1}{2} X_b(x - \Delta x', j + y - \Delta y') + \frac{1}{2} X_f(x + \Delta x', j + y + \Delta y') - Y(x, j + y) \right|$$

$$\left| \frac{1}{2} X_f(x + Dx', j + y + Dy') - Y(x - 1, j + y) \right| \quad (5)$$

$D_r(B, \Delta x', \Delta y')$ 用于测量运动时间连贯性, 其值越小, 其运动矢量时间连贯性越好; $D_s(B, \Delta x', \Delta y')$ 用于测量候选运动矢量的空间连贯性, 其值越小, 候选运动矢量保持空间一致性越好。二者结合可以获得较精确的运动矢量, 使内插块的失真最小。

2.3 多模式运动估计选择

运动估计时块尺寸的选取会影响估计的效果, 尺寸选取过大导致块效应, 而尺寸选取过小会造成视频画面的视觉抖动。16×16 块适合于纹理简单而平坦的区域, 但在快速运动或纹理丰富的视频序列中估计不准确; 4×4 适合于纹理比较丰富的区域, 但在运动平缓或纹理简单的视频序列中, 不能很好地捕捉到运动矢量。因此, 需要根据内插帧内各区域的运动复杂程度选择不同的块尺寸。

由于内插帧信息未知, 很难合适地选取运动估计块的大小。本文采取多模式运动估计, 首先把内插帧划分成不重叠的 16×16 大小的块, 对每个 16×16 大小的块, 采用 16×16, 8×8, 4×8, 8×4, 4×4 五种分割模式, 对于内插帧的一个块, 在前后相邻关键帧中选取一定大小的区域进行搜索, 比较其前一帧中一定位移处的块与其后一帧相反位移处的块, 按上述时空联合判断准则 $J(B, \Delta x', \Delta y')$ 择选最佳运动矢量。

在进行宏块模式判决时, 选择具有最小失真函数的宏块分割模式作为最终的块分割模式, 为了增强插值块在空域上的连续性优先选择大的块分割模式。图 3 是多模式运动估计选择方法, 其中 $J_{16 \times 16}$, $J_{8 \times 8}$, $J_{4 \times 8}$, $J_{8 \times 4}$, $J_{4 \times 4}$ 分别表示五种模式下决策函数。为了减少模式决策时算法复杂度的增加, 给定一个判断阈值 J_{th} , 当某种决策模式下的决策误差小于这个阈值时, 将直接采用这种分割模式, 不再进一步划分。首先进行 16×16 双向运动估计获得最佳运动矢量, 若 $J_{16 \times 16}$ 大于给定阈值时, 进行 8×8 双向运动估计, 计算 $J_{8 \times 8}$ 并判断 $J_{16 \times 16}$ 和 $J_{8 \times 8}$ 大小, 若 $J_{16 \times 16}$ 小于 $J_{8 \times 8}$ 给定阈值, 则采用 16×16 的分割模式, 否则进行 4×8 和 8×4 双向运动估计, 并判断 $J_{8 \times 4}$ 与 $J_{4 \times 8}$ 的大小, 选取二者中较小的值与 $J_{8 \times 8}$ 比较, 若大于则采用 8×8 的分割模式, 否则将其与 4×4 双向运动估计的决策函数 $J_{4 \times 4}$ 比较, 选取较小的值作为最佳运动分割模式。

$$J_{opt} = \arg \{ \min(J_{16 \times 16}, J_{8 \times 8}, J_{4 \times 8}, J_{8 \times 4}, J_{4 \times 4}) \} \quad (6)$$

为了使运动估计获得的运动矢量需要尽可能地与真实运动矢量一致, 从而有效地克服块效应, 与文献[7]类似, 当前块的运动矢量 MV_c 由 8 个相邻运动矢量 MV_j 进行平滑滤波, 滤波权值 w_j 采用上节所述时空联合匹配准则进行估算。

$$w_j = \frac{J(B, MV_c)}{J(B, MV_j)}; j = 1, 2, \dots, 8 \quad (7)$$

在解码端经过运动估计和运动矢量的细化处理后获得当前内插块的最佳运动矢量后, 根据时间相关性采用运动补偿加权帧内插技术^[15], 对相关性较大的帧内插时采用较大的权值, 相关性较小的帧内插时采用较小的权值, 从而获得质量较好的边信息。

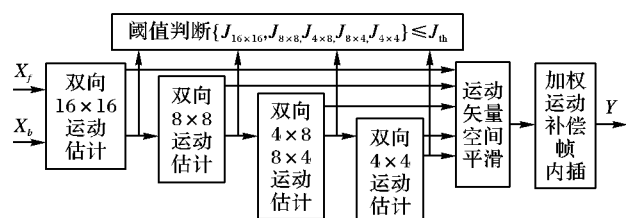


图3 多模式运动估计选择

3 仿真结果与分析

为了评估所提出的基于时空联合的解码边信息插值算法, 对几种典型的视频序列进行了大量的实验, 图像格式为 QCIF, 序列帧频为 15 fps, 运动矢量的精度为整像素, J_{th} 取 36, 仿真程序只对亮度分量进行评估。在相同的条件下比较了目前广泛使用的空间平滑的帧内插算法^[7]和本文所提出的解码边信息插值算法。

图 4 所示是 Foreman 序列第 32 帧采用不同的帧内插算法产生的边信息。为了精确评估帧内插技术产生的错误, 假设关键帧在解码端无损重建即关键帧未编码直接用来产生边信息。从图中可以看出, 简单运动补偿帧内插技术得到的边信息图像部分区域存在明显的错误。通过运动矢量的空域滤波后文献[7]算法使得边信息中这些错误区域得到了平滑, 但是可以看出嘴部区域与原编码 WZ 帧有区别, 而本文算法通过估计前后关键帧与 WZ 帧的相关性, 内插时相关性强的帧采用较高的权值, 因此生成边信息与原 WZ 帧图像更接近, 边信息的峰值信噪比 (Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR) 提高了 0.92 dB。



图4 Foreman 序列不同算法生成边信息比较

图 5 是视频序列关键帧采用 H. 264 帧内编码和解码时前 100 帧内边信息 PSNR 比较。由图可以看出, 本文算法插值后的边信息优于文献[7]算法, Foreman 序列边信息 PSNR 平均提高了 0.72 dB, 最高可以达到 1.41 dB; 小运动 Hall 序列边信息 PSNR 平均提高了 0.21 dB, 最高可以达到 0.50 dB。

表 1 是 Coastguard 序列解码重建 WZ 帧平均 PSNR 值比较。可以看出, 本文算法对系统性能提高较显著, 不但降低了编码码率, 而且解码图像序列质量也得到了提高; 这是因为本文算法对序列间的运动估计更为准确, 加权插值后生成边信息的质量优于文献[7]算法, 从而提高了系统的编码性能。

表 2 是帧内插时不同模块对边信息质量的影响。可以看出, 其中多种块分割模式和时空联合匹配准则对边信息质量的提高贡献较大, 对不同视频序列平均分别提高了 0.18 dB 和 0.31 dB, 这是因为多种块分割方式可以保证不同运动大小的宏块获取最佳块分割模式, 时空联合匹配准则保证了运动矢量的空间平滑性和时间连贯性。双向运动估计主要可以避免单向运动估计时叠补和漏补现象, 降低了算法的复杂度, 但对边信息的质量略有影响。另外, 本文算法的模式选择和空间平滑是在系统解码端进行, 未增加编码端的运算量和开销, 不影响 Wyer-Ziv 系统的低复杂度编码特性。

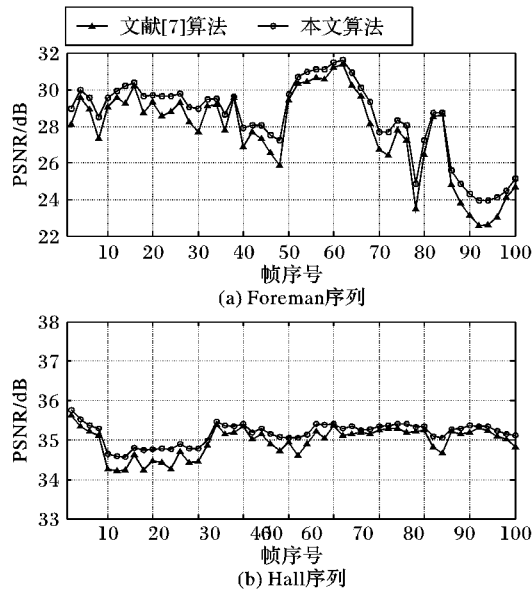


图5 序列边信息 PSNR 的比较

表1 Coastguard 序列解码 WZ 帧平均 PSNR 和码率比较

关键帧平均 PSNR/dB	文献[7]算法		本文算法	
	码率/Kbps	PSNR/dB	码率/Kbps	PSNR/dB
28.62	17.43	28.38	13.72	28.46
31.23	48.08	30.9	43.15	31.07
33.35	75.67	32.47	68.61	32.62
37.11	191.53	36.46	183.44	36.59

表2 帧内插时不同模块对边信息质量的影响

视频序列	文献[7] 算法	双向运动 估计	多种块 分割模式	时空联合 匹配准则	自适应 加权
Foreman	28.78	28.64	29.07	29.26	28.91
Coastguard	30.27	30.17	30.45	30.58	30.38
Hall	34.96	34.95	35.04	35.09	35.00

4 结语

本文提出了一种基于时空联合的解码边信息插值算法。该算法采用双向运动估计选取最佳运动矢量,避免了单向运动估计时叠补和漏补现象;多种模式块大小分割方式保证获取内插边信息帧的最佳块分割模式;模式判决时从空间变化和时间变化两方面综合衡量获取最佳运动矢量。算法可以有效提高内插边信息的质量,在降低编码码率的情况下,提高了系统的性能。边信息在解码端由解码关键帧帧内插产生,关键帧的质量对边信息有很大的影响,今后如何结合系统结构的特点采用新的编码方案对关键帧进行编码有待进一步研究。

参考文献:

- [1] SLEPIAN D, WOLF J K. Noiseless coding of correlated information sources [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1973, 19 (4): 471 - 480.
- [2] WYNER A D, ZIV J. The rate-distortion function for source coding with side information at the decoder [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1976, 22(1): 1 - 10.
- [3] AARON A, ZHANG R, GIROD B. Wyner-Ziv coding of motion video [C]// Conference Record of the Thirty-Sixth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Piscataway: IEEE, 2002, 1: 241 - 244.
- [4] NATÁRIO L, BRITES C, ASCENSO J, *et al.* Extrapolating side information for low-delay pixel-domain distributed video coding [C]// VLBV'05: Proceedings of the 9th International Conference on Visual Content Processing and Representation. Berlin: Springer-Verlag, 2006: 16 - 21.
- [5] 卿鄰波, 何小海, 吕瑞, 等. DVC 中基于亚像素 MCI 的边信息重建[J]. 计算机工程, 2010, 36(3): 224 - 226.
- [6] LIU RONGKE, YUE ZHI, CHEN CHANGWEN. Side information generation based on hierarchical motion estimation in distributed video coding [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2009, 22(2): 167 - 173.
- [7] ASCENSO J, BRITES C, PEREIRA F. Improving frame interpolation with spatial motion smoothing for pixel domain distributed video coding [C]// 5th EURASIP Conference on Speech and Image Processing Multimedia Communications and Services. Slovak: INSPEC, 2005: 1 - 6.
- [8] ASCENSO J, BRITES C, PEREIRA F. Content adaptive Wyner-Ziv video coding driven by motion activity [C]// ICIP 2006: IEEE International Conference on Image Processing. Piscataway: IEEE, 2006: 605 - 608.
- [9] ARTIGAS X, TORRES L. Iterative generation of motion-compensated side information for distributed video coding [C]// ICIP 2005: IEEE International Conference on Image Processing. Piscataway: IEEE, 2005: 833 - 836.
- [10] 卿鄰波, 何小海, 吕瑞, 等. 分布式视频编码中边信息的多策略优化[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2008, 40(1): 138 - 142.
- [11] 马力, 苏卓涵, 杨春玲. 基于多假设运动补偿预测的边信息改进方法[J]. 计算机工程, 2011, 37(12): 248 - 250.
- [12] 刘东, 杜明辉. 基于块的分布式视频编码边信息生成技术[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2011, 39(2): 32 - 38.
- [13] ZHANG YONGBING, ZHAO DEBIN, LIU HONGBIN, *et al.* Side information generation with auto regressive model for low-delay distributed video coding [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2012, 23 (1): 229 - 236.
- [14] 尹明, 章云, 程良伦, 等. 分布式视频编码的自适应图像组结构研究[J]. 计算机应用, 2010, 30(5): 1356 - 1358.
- [15] 王凤琴, 樊养余, 张政伟, 等. 一种有效的自适应边信息帧内插算法[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(22): 7215 - 7218.
- [9] GUO HUA, MU YI, LI ZHOUJUN, *et al.* An efficient and non-interactive hierarchical key agreement protocol [J]. Computers & Security, 2011, 30(1): 28 - 34.
- [10] SUCEC J, MARSIC I. Clustering overhead for hierarchical routing in mobile Ad Hoc networks [C]// INFOCOM 2002: Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Piscataway: IEEE, 2002, 3: 1698 - 1706.
- [11] KAUR T, BAEK J. A strategic deployment and cluster-header selection for wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2009, 55(4): 1890 - 1897.
- [12] ZHURONGBO, QIN YINGYING, WANG JIANGQING. Energy-aware distributed intelligent data gathering algorithm in wireless sensor networks [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2011, 2011: 1 - 13.
- [13] KISHINO Y, SAKURAI Y, KAMEI K, *et al.* Data gathering in high-density wireless sensor networks using hierarchical clustering [C]// ISWCS '08: IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems. Piscataway: IEEE, 2008: 547 - 551.
- [14] BASAGNI S, HERRIN K, BRUSCHI D, *et al.* Secure pebblenets [C]// MobiHoc '01: Proceedings of the 2nd ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing. New York: ACM, 2001: 156 - 163.
- [15] GERLA M, TSAI J T-C. Multicluster, mobile, multimedia radio network [J]. Wireless Networks, 1995, 3(1): 255 - 265.

(上接第 2261 页)