

## 无线多媒体传感器网络视频编码研究

樊晓平<sup>1,2</sup>, 熊哲源<sup>1</sup>, 陈志杰<sup>1</sup>, 刘少强<sup>1</sup>, 瞿志华<sup>1,3</sup>

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 湖南财政经济学院 信息管理系, 湖南 长沙 410205;

3. 美国中佛罗里达大学 电气与计算机工程系, 奥兰多 FL32816-2450, 美国)

**摘 要:** 在资源受限的无线多媒体传感器网络中存在大量的视频数据需要处理和传输。为充分地利用这些有限的资源, 需要设计一个能够综合考虑能量消耗和压缩率、图像质量之间平衡的视频编码方案。对无线多媒体传感器网络中视频编码技术的发展现状、面临的挑战和设计目标进行了讨论。对无线多媒体传感器网络视频编码现有的解决方案和理论研究成果进行探讨, 分别从个体信源编码和分布式信源编码两方面进行分类探索。最后, 对个体信源编码存在的一些问题进行讨论, 并指出了未来研究的方向。

**关键词:** 无线多媒体传感器网络; 视频编码; 资源约束; 个体信源编码; 分布式信源编码

中图分类号: TN911.21

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2011)09-0137-10

## Video coding in wireless multimedia sensor networks: a survey

FAN Xiao-ping<sup>1,2</sup>, XIONG Zhe-yuan<sup>1</sup>, CHEN Zhi-jie<sup>1</sup>, LIU Shao-qiang<sup>1</sup>, QU Zhi-hua<sup>1,3</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

2. Department of Information Management, Hunan University of Finance and Economics, Changsha 410205, China;

3. School of Electrical Engineering and Computer Science, University of Central Florida, Orlando, FL 32816-2450, USA)

**Abstract:** There are a large number of video data have to be processed and transmitted in resource-constrained wireless multimedia sensor networks (WMSN). One possible way to achieve the maximum utilization of those resources is to apply an adaptive video coding scheme, which must consider the trade-off among energy consumption, compression ratio and image quality. The state-of-the-art in video coding techniques, the major research challenges and the objectives of video coding for WMSN are discussed. Existing solutions and theoretical explorations of video coding for WMSN are investigated and classified, including single source coding and distributed source coding. Finally, fundamental issues of single source coding are discussed, and future research trends in this area are outlined.

**Key words:** wireless multimedia sensor networks; video coding; resource constraint; individual source coding; distributed source coding

### 1 引言

无线传感器网络(WSN, wireless sensor networks)由具有感知、计算和通信能力的传感器节点组成, 可以对温度、湿度、光照强度等数据进行采

集、传输和处理<sup>[1]</sup>。近年来, WSN 在目标跟踪、过程控制和视频监控等方面的应用, 促使装备有摄像头和麦克风, 能产生大量多媒体数据的无线多媒体传感器网络(WMSN, wireless multimedia sensor networks)的出现和发展<sup>[2]</sup>。由于 WMSN 在能量、计

收稿日期: 2010-05-14; 修回日期: 2011-05-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60870010, 60776834)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (60870010, 60776834)

算和存储等方面受到的限制，在传输多媒体数据特别是视频数据之前必须对其进行压缩编码，减少数据传输量以节约能量。但有损压缩会使图像失真，且压缩率越高，图像质量越差。同时，视频编码的计算复杂度高，也会消耗许多能量。如何同时保持较低的能量消耗和可靠的图像质量，需要在计算复杂度和通信数据量之间达到平衡，这是亟待解决的问题。

视频由图像序列组成，视频编码也是以图像编码为基础。第一代图像编码技术包括预测编码、变换编码、统计编码、向量编码和小波编码等，第二代图像编码技术包括基于分割的编码、基于模型的编码和分形编码等<sup>[3]</sup>。传统视频编码主要使用 2 种结构，一种是帧内编码联合帧间像素预测，另一种是目前广泛使用的帧内编码联合运动补偿。

目前主要有两类视频编码标准：国际标准化组织(ISO)的 MPEG-x 系列和国际电信联盟(ITU)的 H.26x 系列，它们的编码器结构主要包括运动补偿预测、离散余弦变换、量子化、熵编码等 4 个部分<sup>[4]</sup>。由于运动估计补偿的计算量很大，视频编码中编码器的计算复杂度一般是解码器的 5~10 倍。WMSN 节点资源受限，难以执行计算量巨大的视频编码任务，这将占用大量处理器资源和存储空间，并使节点能量很快耗尽。因此，需要为节点设计简单的视频编码器以降低计算复杂度，并且保证较高的压缩率和较好的视频解码质量。

## 2 WMSN 中视频编码面临的问题和挑战

在传统的有线和无线环境中传输的视频帧率高，数据量大，一般采用混合编码方式来提高压缩率，用帧内编码(如熵编码、变换编码)减小一帧图像内部的冗余，用帧间编码(如预测编码、运动估计补偿)减小序列图像帧之间的冗余。但是，帧间编码增加了图像失真率，且占用了大量资源，计算复杂度高、数据存储量大，不适用于资源受限、无线多跳的 WMSN。此外，WMSN 主要应用于区域监控，如公共场所、交通场景、敏感区域和智能家居等，其捕获的视频帧率较低，数据量较小，但要求图像失真率低，以便于进行目标跟踪和分析，使用计算复杂度较低、存储空间较小的帧内编码可以满足其对压缩率和图像质量的要求。影响 WMSN 视频编码的主要因素如下<sup>[5]</sup>。

1) 资源受限：传感器节点一般由电池供电，装

备嵌入式微处理器和存储芯片，其能量、计算能力、存储空间和发送功率等都十分有限。

视频编码可以减小数据发送量，降低通信的能耗<sup>[6]</sup>。但是，数据压缩率和编码计算复杂度成正比，提高数据压缩率，减少了通信的能耗，却增加了视频编码计算的能耗。数据压缩率与视频解码质量成反比，数据压缩率越高，视频解码质量越低，提高数据压缩率可能使得图像质量无法满足应用的要求。因此，需要解决节点资源受限和视频编码计算复杂度高、要求高质量视频之间的矛盾。例如，Wu 等提出在给定网络条件和图像质量限制时，一个自适应算法可使计算和通信能量消耗之和达到最小值<sup>[7]</sup>。图 1 是节点发送和接收视频数据的全过程。

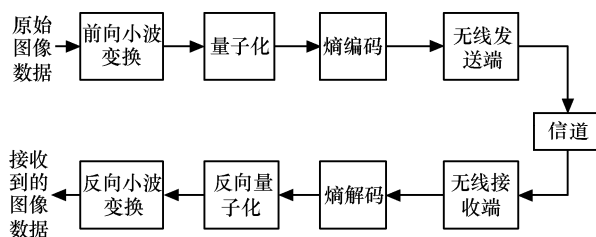


图 1 节点上视频数据的发送和接收过程

假设所有节点的通信距离都为  $d$ ，中继节点只负责转发数据，每比特数据传送距离  $d$  所消耗能量为  $E_{TX}(d)$ ，接收 1bit 数据所消耗能量为  $E_{RX}$ ，压缩 1bit 数据且压缩率为  $\beta(l)$  时所消耗能量为  $E_c(l)$ ，则将一幅图像传送到基站所需的能量消耗为

$$E_{total} = kE_c(L) + nk\beta(l)[E_{TX}(d) + E_{RX}]$$

如图 2 所示，存在一个最优值  $L_{opt}$  使得通信距离  $d$  取不同值时能量消耗最小。

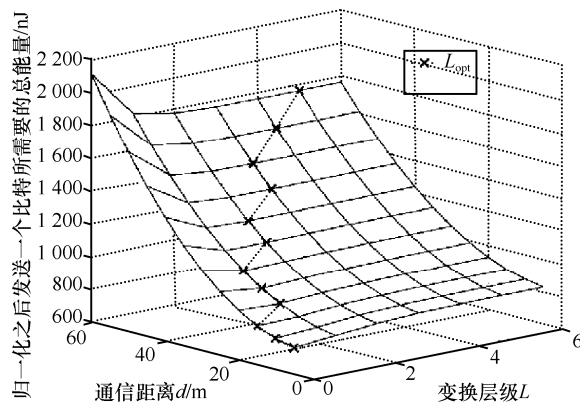


图 2 总体能耗与变换层级  $L$  和通信距离  $d$  的关系

2) 不可靠性：由于信号衰减和多径/阴影干扰等因素，无线信道的误码率较高；而编码后的视频数据

相关性较小,对数据错误敏感,单个误码比特会导致后续众多数据失效,严重影响视频数据的质量。而监控视频数据对实时性要求高,难以使用数据重传技术。因此,需要解决无线信道误码率高、视频编码对数据错误敏感和要求高质量视频之间的矛盾。

3) 带宽波动:无线信道带宽波动剧烈,且视频编码输出的比特流也不均匀,而视频流的传输需要比较稳定的带宽,带宽波动会严重影响视频的重建质量。当网络负载超过允许带宽或节点移动时,无线信道中会出现拥塞和分组丢失,数据分组大量丢失将导致视频数据流阻塞,图像中出现马赛克,甚至不能正确解码<sup>[8]</sup>。因此,需要解决无线信道带宽波动剧烈和要求高质量视频之间的矛盾。

4) 异构性:在多播(multicast)场景中,由于接收端在网络延迟、视频数据质量、处理能力、能量限制和带宽限制等方面各不相同,给视频的多播传输造成很大困难<sup>[9]</sup>。

节点捕获的视频数据需要通过有损的无线信道进行可靠传输,并要求能量消耗和发送的数据量尽可能得小<sup>[10]</sup>。由此可知,WMSN中视频编码的设计目标如下。

1) 高压缩率:未压缩的视频流数据率很高,会消耗许多能量和带宽,必须提高数据压缩率来降低带宽占用率和能量消耗。

2) 低复杂度:视频编码器嵌入在节点设备中,必须具有低复杂度以减小处理器和内存占用,必须低功耗以延长节点寿命。

3) 容错:节点编解码器必须提供健壮的、可容错的视频编码。

### 3 面向 WMSN 的视频编码

基于运动估计和补偿的预测编码运算量很大,传感器节点的嵌入式微处理器大多难以执行视频编码任务。因此,视频节点主要采用 JPEG、JPEG 2000 等静态图像编码标准进行图像压缩。目前,可用于 WMSN 的图像编码方式包括个体信源编码和分布式信源编码 2 种<sup>[11]</sup>。

#### 3.1 个体信源编码

由于个体信源编码十分简单,各信息源之间无需进行通信,因而被广泛使用。在传感器节点平台上试验过的图像/视频编码和传输方案都是基于个体信源编码方式。根据所采用的压缩技术,WMSN 中的个体信源编码可分为单层编码和多层编码两大类。

#### 3.1.1 单层编码

单层编码方案主要包括基于差异编码的 JPEG 和基于改进离散余弦变换(DCT, discrete cosine transform)的 JPEG 2 种。在视频监控时,基站周期性地产生并发送一个参考帧到节点,节点只发送监测图像与参考帧的差异到基站。监控场景一般变化少,发送的数据量小,因而能量消耗较低。为此,学者们研究了 DCT 变换的能量压缩特性,对其中的处理过程和变换参数进行优化,并将其应用于关联性较高图像的压缩编码。

Chiasserini 等用定点 DCT 运算替换浮点 DCT 运算以优化 JPEG<sup>[12]</sup>,对参考帧进行压缩以减少计算复杂度。随后,又提出一种基于变化检测和兴趣区域编码的改进 JPEG 编码方案。Pekhteryev 等在 ZigBee 网络中传输了 100 张 JPEG 标准的图像和 100 张 JPEG2000 标准的图像<sup>[14]</sup>,证明了在 ZigBee 网络中传输 JPEG 和 JPEG2000 图像的可行性。Feng 等设计了一个视频传感器节点平台<sup>[15]</sup>,使用 JPEG、差异 JPEG 和条件补给的压缩方式。图像像素为 640×480 时,可以达到每秒 5 帧的传输速度;像素为 320×240 时,可达到每秒 20 帧的传输速度。

Mammeri 等研究 JPEG 中 8×8 DCT 系数矩阵的裁剪优化<sup>[16~18]</sup>,进行 DCT 变换时,选择处理 8×8 矩阵中的一个方块区域和一个三角形区域的系数,分析裁剪后编码的能量消耗与图像质量,并提出了 2 种选择系数区域尺寸的方法,在全局方法中计算出适用于图像中所有 DCT 系数块的唯一尺寸;在局部方法中将图像分为兴趣区域和碎片区域,分别计算适合的系数区域尺寸。遗憾的是,他们没有给出能自动识别图像区域兴趣等级和自动分配相应系数块尺寸的方法。

Lee 等提出一种改进的 JPEG 图像编码方案<sup>[19,20]</sup>,在确保编码所需最小精度的情况下,通过分析法决定如何分配最优整数和带宽给压缩过程的信号路径,以降低计算复杂度,并保证较好的图像质量。在视频节点平台上的实验表明,编码图像相比于未编码图像,其传输时间和能量消耗都显著降低。其改进算法与 JPEG 标准相比,在确保信噪比不变的情况下,比原标准减少 25%的运算量;在允许少量信噪比损失的情况下,运算量约为原标准的一半。分析实验中测得的工作电压、运算时间和能量消耗得出结论,计算过程的能量消耗由运算时间和处理器功耗综合决定,并非处理器功耗低计算的能耗就

小, 提高运算速度是降低计算能耗的有效方法。此外, 还在节点上测试了 JPEG 的一些高级应用, 如兴趣区域编码、连续式或渐进式图像传输等。

综合起来看, 单层编码方案的能耗较低, 因为结合变化检测和差异编码的 JPEG 算法使数据通信量显著减少, 对 DCT 变换的简化可以降低计算复杂度。然而, 这种方法也存在一些缺陷和不足: 1) 差异编码的图像难以进行图像融合, 因为图像融合需要将以前的数据信息存储在汇聚节点, 而差异编码并未保存完整的图像信息; 2) 对参考帧的质量要求很高, 任何一点错误都会传播给依据参考帧进行编码的其他帧, 降低它们的质量, 同时, 也会限制通过调整 DCT 变换系数的量化规模进行的码率调节; 3) 不支持错误恢复、差错控制和信源信道联合编码; 4) 减少能量消耗的同时也降低了基站接收到的图像质量。

### 3.1.2 多层编码

多层编码方案主要采用基于小波变换的 JPEG 2000 编码方法, 通过调整小波变换层级和量化层级来改变压缩率。在多层编码机制中, 信号被分为一个基础层和多个增强层进行发送。基础层的传输有很高的优先级并采用错误保护, 而增强层的传输则采用较少的差错控制位, 在信道拥塞时会被丢弃。如果一个比特流中出现一个错误, 它所在层级的后续比特流将被丢弃, 而其他层级的数据流不会受到影响。根据图像内容、信道条件和率失真限制, 可以选择最优的层级数量和信道编码数量, 使总的能量消耗达到最小。

Wu 等设计了一种基于小波域图像分解的多比特流图像编码方案<sup>[21]</sup>, 将小波变换系数依据父子关系分为不用的块, 每个块独立地采用分层树集合划分(SPIHT, set partitioning in hierarchical tree)算法进行编码。Yu 等设计了一种基于 JPEG 2000 的图像传输系统<sup>[22]</sup>, 采用码率兼容删除卷积, 联合信源信道编码和能量控制算法计算出最优传输分层数量和每一层相应的优化策略。然而, 这种方法仅考虑了点对点的传输, 在许多应用中信号的传输过程需要中继节点进行转发。Wu 等提出了一种启发式图像编码算法<sup>[23]</sup>, 在给定网络环境和图像质量限制的条件下, 选择基于小波变换的图像压缩最优参数使得总体能量消耗最小。Lu 等研究了基于 DSP 视频节点平台的低功耗 JPEG 2000 压缩<sup>[24]</sup>, 用定点 LS9/7 替换浮点 CDF9/7 小波变换滤波器, 通过基于移位一

定点实现提升系数  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\delta$ , 基于移位一乘定点实现提升系数  $\gamma$ , 基于后拉伸和移位一乘定点实现缩放因子  $\zeta$ , 以减少计算复杂度。实验中对  $1024 \times 1024$  像素的遥感图像进行 4 级小波变换, LS9/7 定点小波较之 CDF9/7 小波分数法和算术移位法定点, 其计算复杂度分别降低了 34.0% 和 28.3%。

总之, 多层编码方案的误码率低, 图像质量较好, 可以使用信源信道联合编码来适应信道条件的变化。然而, 增加码率调整的灵活性意味着会消耗更多的能量。此外, 由于内存和计算能力的限制, 传感器节点很难编码一幅完整的图像帧, 也无法根据编码变化和层级冗余进行自适应数据汇聚。因此, 多层编码的研究相比单层编码要少许多。

目前, WMSN 中的个体信源编码主要研究单个静态图像的编码, 结合运动估计和补偿以减少序列图像时间冗余的编码算法也是值得研究的。

### 3.2 分布式信源编码

在个体信源编码方式中, 由编码器利用信号源统计信息进行编码。而分布式编码理论认为可以部分或全部由解码器端利用信号源统计信息来实现压缩<sup>[25, 26]</sup>。分布式信源编码对多个相互关联的传感器节点的输出数据进行压缩, 相互之间无需进行协同, 或者仅需少量的协同, 在中心解码器进行联合解码, 如图 3 所示。其最大优势就是将编码器的计算负载转移到解码器上<sup>[27]</sup>。这种编码方式非常适合 WMSN 中的视频节点应用。近年来, 已经有一些对基于 Wyner-Ziv 理论的分布式视频编码的研究, 但迄今为止还没有实际的解决方案。

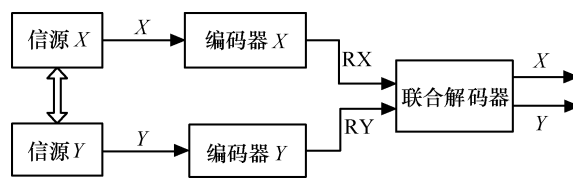


图 3 分布式压缩 2 个统计独立随机处理信源 X 和 Y, 并在解码器端联合解码 X 和 Y

#### 3.2.1 像素域 Wyner-Ziv 编码

Aaron 等提出一种基于像素域 Wyner-Ziv(PDWZ, pixel-domain Wyner-Ziv)动态视频编码方案<sup>[28-30]</sup>, 采用帧内编码和帧间解码的方式, 如图 4 所示。关键帧用基于  $8 \times 8$  DCT 变换的帧内编解码方式, 关键帧之间的 Wyner-Ziv 帧采用帧内编码和帧间解码方式。每个 Wyner-Ziv 帧量化之后, 符号块被发送给执行码率兼容删除 Turbo 码(RCPT,

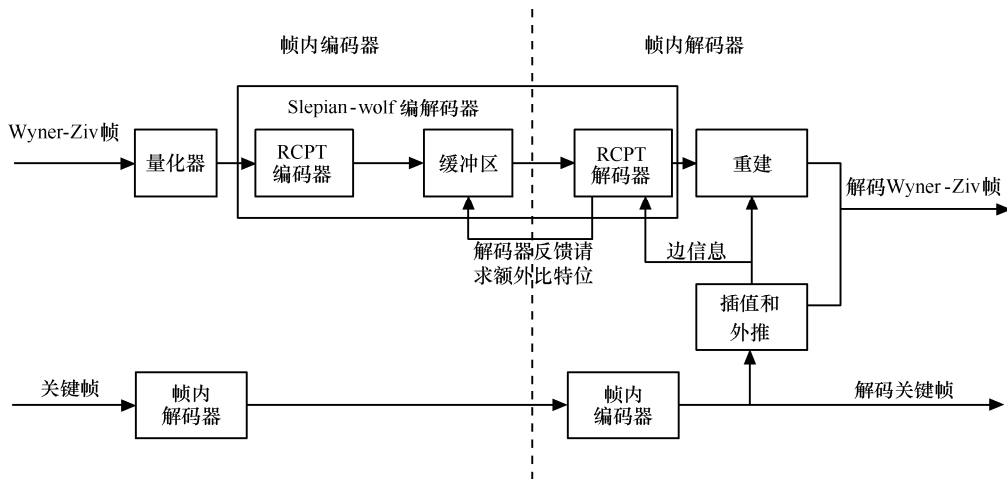


图4 像素域 Wyner-Ziv 编码器结构

rate-compatible punctured Turbo code) 的 Slepian-Wolf 编解码器。RCPT 编解码器产生校验位并将其存储在缓存中, 如果原始符号无法被可靠地解码, 解码器就发出一个请求校验位的比特流。对每一个 Wyner-Ziv 帧, 解码器结合边信息和校验位来重建原始的符号序列, 边信息由解码器对已解码的关键帧和 Wyner-Ziv 帧使用插值法或归纳法产生。

PDWZ 编码过程十分简单, 不需要进行运动估计和补偿、DCT 变换和前向 DCT 变换。Slepian-Wolf 编码器只需 2 个反馈转换寄存器和一个交织器。然而, 边信息和反馈仍然是影响 PDWZ 编码的 2 个主要因素。

边信息对 PDWZ 编解码器的率失真影响很大, 边信息越精确则错误越少, 需要的校验位少, 比特流也小。Ascenso 等提出在编码器端用新的运动补偿帧归纳工具来产生更精确的边信息<sup>[32]</sup>, 随后又提出一个顽健的归纳运算模块<sup>[33]</sup>, 在运动区域平滑的基础上产生边信息, 从而提高延迟较低的 PDWZ 视频编解码器的性能。

PDWZ 编码的主要缺点是需要接收端的在线反馈, 尽管使用信道反馈可以获得一个更准确的码率分配方案, 但这在单向和脱机应用中是不可行的, 会造成严重的延迟。Morbee 等提出一种不需使用信道反馈而能适用于 PDWZ 视频编解码器的码率分配算法<sup>[34]</sup>, 能计算出每个视频帧编码后的比特率, 并且不会显著增加编码器的复杂度。

Aaron 等的 PDWZ 编解码器仅利用了视频图像序列之间的时间关系, Tagliasacchi 等提出一种可以利用空间和时间关系的 PDWZ 编解码器<sup>[35]</sup>。与之相似, Avudainayagam 等在解码器端利用一帧图像

内的空间关系<sup>[36]</sup>, 将时间和空间边信息看作是 2 个虚拟信道的输出, 结合时间和空间边信息的多样性来提高 Wyner-Ziv 解码器的性能。Xue 等提出采用切片结构来优化 PDWZ 的码率控制<sup>[37]</sup>, 以减小率失真, 并提高视频质量。

### 3.2.2 变换域 Wyner-Ziv 编码

Aaron 等提出一种基于变换域 Wyner-Ziv (TDWZ, transform-domain Wyner-Ziv) 视频编解码器, 如图 5 所示。首先, 对每幅 Wyner-Ziv 帧进行分块 DCT 变换, 变换系数独立地进行量化并组成系数带。然后, 由 Slepian-Wolf Turbo 编解码器进行压缩。与像素域编码方案相似的是, 解码器利用先前重建的帧来产生边信息。分块 DCT 变换用于边信息帧, 产生边信息系数带。Turbo 解码器利用相关的边信息来独立地重建量化系数带。给定的重建符号和边信息, 每个系数带可依据最佳估计值获得重建。

Ramchandran 等提出了另一种变换域视频编码方案<sup>[39-41]</sup>, 编码器端的一些简单的时间依赖估计值被用于执行码率控制, 而不需要接收端的反馈。分块 DCT 变换后面进行统一的标量量化, 尽管如此, 每个块还是独立地进行编码。

TDWZ 视频编码也会受到反馈和边信息的影响。在许多视频编码应用中, 往往不允许信道反馈。一般来说, 信道反馈会带来延迟, 从而增加解码器的复杂度。Brites 等通过一些量化指标, 如信道反馈的使用频率和关联率来分析信道反馈对 TDWZ 视频编码的影响<sup>[42]</sup>。为了避免使用信道反馈, 他们又提出一种用于 TDWZ 视频编码的编码器码率控制方案<sup>[43]</sup>, 包括 2 个主要部分: 低复杂度边信息估

计模块和校验位估计模块。Sheng 等提出在编码器预测每幅 Wyner-Ziv 帧的比特数<sup>[44]</sup>，作为编码方式和量化系数的函数。

边信息的质量对压缩效率影响很大。Martins 等提出一种适用于 TDWZ 视频编解码器的边信息改进算法<sup>[45]</sup>，在解码过程中通过学习使边信息逐渐改进。Badem 等采用边信息迭代改进技术提出了一个 TDWZ 编码改进方案<sup>[46]</sup>。

分布式信源编码十分依赖信息源和边信息之间的统计相关性，在 TDWZ 中被称为相互关系噪声。图像序列中运动的数目对预测精度的影响很大，其相互关系不是时间和空间固定的。Esmaili 等提出一种通过边信息精度来定义每个频率带上相互关系噪声的不同等级的算法<sup>[47]</sup>。Huang 等提出一个用于 TDWZ 视频编码的改进的虚拟信道噪声模型<sup>[48]</sup>。Skorupa 等则讨论了一种将像素域估计值转换到变换域的方法<sup>[49]</sup>。Brites 等提出了一种更为可行的 Wyner-Ziv 视频编码方法<sup>[50]</sup>，在编码器端在线估计相互关系噪声模型的参数，这种方法同时适用于像素域和变换域 Wyner-Ziv 视频编解码器。

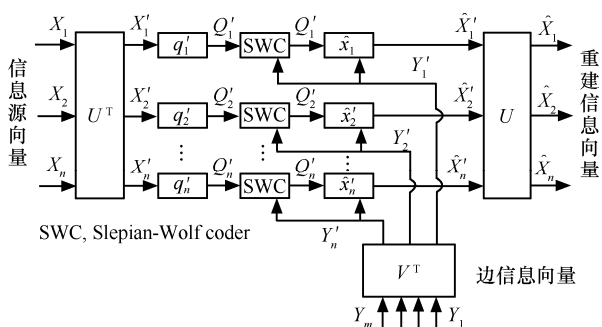


图 5 变换域 Wyner-Ziv 编码器结构

### 3.2.3 协同编码

不同于 Wyner-Ziv 编码，协同编码是适用于 WMSN 的另一种分布式图像编码方案。Wagner 等使用图像匹配的方法来找到相互关联的图像<sup>[51]</sup>，以定义其中的最大重叠区域，发送低分辨率的重叠区域图像给基站，基站使用超像素还原技术重建重叠区域的高分辨率图像。但是，他们仅考虑了图像之间的时间冗余，而且这种算法仅适用视频节点密集部署的情况。Wu 等提出一种改进算法<sup>[52]</sup>，对于给定的图像序列，背景图像只发送一次，之后仅发送感兴趣区域的图像及其空间位置给基站，基站融合背景图像和目标区域图像，并结合其空间位置来重

建完整的图像。Lu 等在分簇的网络结构中使用基于双正交重叠变换(LBT, lapped biorthogonal transform)的分布式协同图像压缩方案<sup>[53]</sup>，使视频节点与周边的中继节点协作完成图像压缩与传输任务，以降低单个节点的计算复杂度和能量消耗，如图 6 所示。视频节点负责图像采集以及图像数据的列时域预处理，并将数据传输至中继节点；中继节点负责进行列 DCT、行时域预处理、行 DCT 以及 8×8 LBT 系数块的编码；最后将压缩得到的码流汇聚到簇头节点。如果 WMSN 中节点密度足够大，使得视频节点在无线通信链路的连通区域内其邻居节点集不为空时，该算法可以有效地降低能量消耗。

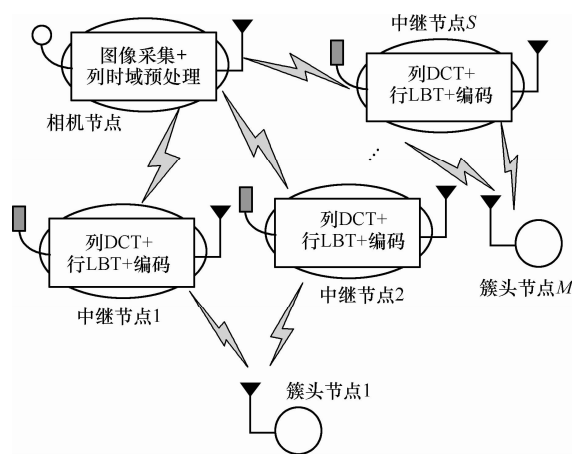


图 6 基于 LBT 的多节点协同压缩

分布式信源编码存在一些缺陷<sup>[54]</sup>：1)它需要编码器之间保持同步，因为解码器是使用时间相关信息来解码的；2)为了有效利用分布式压缩技术，需要获得多个信源数据之间的相互关系模型，这是十分困难的工作；3)结合边信息的分布式信源编码需要节点之间的一些协作；4)为有效利用数据的相互关系进行分布式信源编码，至少需要 3 个以上的信息源。这些问题都难以解决，目前还没有相关的理论研究进展。

## 4 未来研究方向

理论上，分布式信源编码能够有效降低视频编码的计算复杂度，转移计算负载，十分适合于资源受限的 WMSN。但是，要使视频节点相互协作，并保持编码器之间的同步，节点之间要频繁地进行数据交换，这将大量占用无线信道的带宽，使得通信的能量消耗显著增加，相比于计算过程能耗的降低似乎得不偿失。综合 WMSN 视频编码面临的困难

和个体信源编码、分布式信源编码的优势与缺陷，以及 2 种编码方式的研究进展，个体信源编码发展较快，且更适合于 WMSN 的应用需求。下面针对个体信源编码中单层编码方案和多层编码方案存在的一些缺陷，考虑 WMSN 视频编码所面临的问题，并结合设计目标，即高压缩率、低复杂度和容错，提出相应的改进研究方向。

#### 4.1 图像融合

个体信源编码中单层编码方案不支持图像融合。然而，WMSN 中一般部署多个视频节点以覆盖监视区域，事件发生后，目标区域的节点会向基站发送相似的高质量图像，产生相同数据的多个副本。这些副本并不增加信息量，却会造成严重的网络拥塞和巨大的能量消耗。如果在汇聚节点将相互关联的图像进行融合，能够有效地减少数据通信量，提高资源利用率。此外，根据应用环境的不同，WMSN 中可能使用不同类型的图像传感器，如静态彩色摄像头、夜视摄像头、全景视觉摄像头、可变焦云台摄像头等。不同图像传感器的成像模式不同，使用的编码算法不同，所获得的图像之间存在冗余性和互补性。通过融合不同图像传感器获得的信息，可以对监控区域的动态进行简明和持续的描绘，从视频数据中提取关键事件，并采取有效应对措施<sup>[55]</sup>。目前已有学者在进行相关研究，但还处于探索阶段。因此，研究适用于 WMSN 的图像融合机制是十分必要的。

例如，可以使用特征级图像融合算法实现同类多传感器对同一事件的副本图像的融合，如图 7 所示。各传感器从其所获得的图像中提取特征信息，如边缘、纹理、光谱和亮度区域等。汇聚节点按特征信息对多传感器图像数据进行分类、汇集和综合。这样实现了信息压缩，计算量小，处理速度快，并且能最大限度地给出决策分析提供所需要的特征信息。

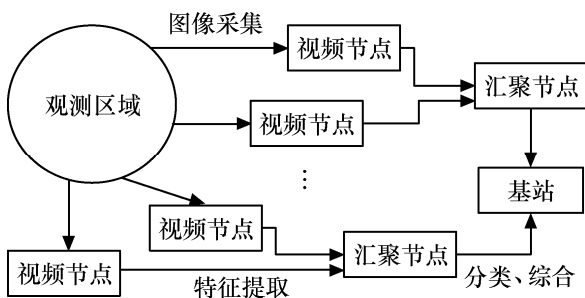


图 7 多传感器图像的特征级融合

#### 4.2 可伸缩视频编码

个体信源编码中单层编码方案不支持错误恢复、差错控制和信源信道联合编码，码率控制受限，在带宽有限、噪声干扰多的无线信道中，当视频数据流的比特率变化范围较大时，分组丢失和误码的增加会影响传输的可靠性。可伸缩视频编码(SVC, scalable video coding)可以增强码流对网络带宽变化、误码和分组丢失的适应性。SVC 将视频信息按照重要性分解，对各部分按照其统计特性编码，信息源根据网络条件的变化调整传输的数据量。当传输或储存环境好时，传送高品质的视频码流；当传输带宽或存储空间不足时，就牺牲视频尺寸、帧率和图像质量中的一个或多个。通过分组丢失或截断码流即可获得较低质量、较低空域分辨率和/或时域分辨率的图像，且所有子码流的编码效率与相应非可伸缩视频编解码器相当<sup>[56]</sup>。SVC 可以为 WMSN 视频传输提供简单、灵活的解决方案，也简化了解码器的设计。但 SVC 依赖于基本层，使其传输可靠性降低，而且编码的复杂性大，增加能量消耗。目前，主要以 H.264/AVC 为基础进行 SVC 的研究，但这个编码标准不适用于 WMSN。因此，深入研究 SVC，探索适用于 WMSN 的改进方案具有重要的研究价值。

例如，可以使用带反馈的 SVC 来增强传输的可靠性，如图 8 所示。由于视频帧长度过大，一个视频帧通常被分成多个数据分组传输，部分数据分组的丢失会使接收端得不到完整的数据帧。解码端根据信道的分组丢失率，即收到的视频帧的完整性，向编码端发送反馈信息，使码流截断模块选择适当的传输数据量。如果正确收到基本层的数据分组，则将此帧转给解码器，并向发送端返回确认消息。若检测到基本帧的数据分组丢失，则向发送端返回请求重发消息。帧级反馈比数据分组级反馈的信息量少了，节省了一定的无线带宽资源。

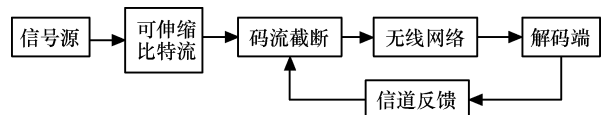


图 8 带反馈的 SVC 编码传输

#### 4.3 多重描述编码

个体信源编码中多层编码方案十分依赖于基础层数据，若基础层发送失败，则将使得增强层数据不能使用，而无线信道中发生误码、拥塞或延迟

情况较多,会影响基础层数据的发送,这将严重降低图像的解码恢复质量,甚至无法对图像进行正确解码。多重描述编码(MDC, multiple description coding)是一种能有效提高图像信息传输顽健性的信源信道联合编码方式,将同一视频信息编码为多个独立的描述,任何一个描述码流都能单独解码,并获得一个可接受的恢复质量。接收端接收到的码流越多,恢复的视频质量越好<sup>[57]</sup>。WMSN 中发送端和接收端之间存在多条相互独立的信道,虽然网络传输可靠性较低,但同时发生错误、数据分组丢失的概率很小,MDC 的一个或多个码流可以通过不同信道到达接收端,如图 9 所示,这将提高 WMSN 视频传输的顽健性和实时性,而且无须重传、延时小<sup>[58]</sup>。当传输数据率较低时,MDC 的性能低于多层编码方式,高于单层编码方式,因为单层编码不提供错误恢复机制。MDC 视频编码的研究处于起步阶段,现有的 MDC 大多是基于块的运动估计和运动补偿的编码方案,产生和发送多个描述码流越会占用许多资源,会使传感器节点的能量很快耗尽<sup>[59]</sup>。另外,在任何信道都可能随机地发生分组丢失,MDC 同样要考虑信道对视频重建质量的影响。因此,需要在控制数据冗余,提高网络带宽利用率和数据传输顽健性之间找到一个平衡,对 MDC 进行改进以适用于 WMSN。

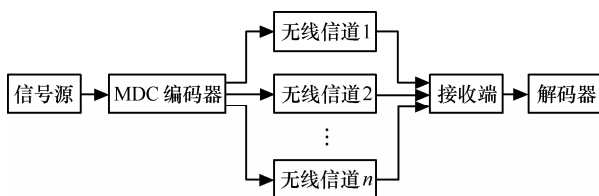


图 9 MDC 编码传输

#### 4.4 目标识别

在 WMSN 的大多数应用中,目标识别都是设计过程中必须考虑的问题之一。在个体信源编码中使用目标识别技术,探测监控场景中的感兴趣区域,就无需传输全部的视频流,而只要传输监测图像序列的部分图像帧或一帧图像中的兴趣区域,这样可以有效地节约资源。分割监测场景中人物和车辆等目标的特征,要求传感器节点对监测图像序列进行分析处理,探测到场景变化和事件发生,并考虑视频传感器的噪声和光照条件的变化等对识别精确性的影响,待识别出目标后再进行传输<sup>[60]</sup>。目前,学者已研究出许多有线视频监控环境的目标识

别方法,但计算复杂度很高,不适用于资源受限的 WMSN。因此,研究计算复杂度较低、能够充分利用 WMSN 有限资源的目标识别算法也是值得研究的课题。

## 5 结束语

WMSN 在目标跟踪、过程控制和视频监控等方面有着广泛的应用前景。视频编码对 WMSN 有着重要的研究价值,是减少数据传输量,降低能量消耗,延长网络生命周期的关键技术之一。本文分析了 WMSN 中的视频编码所面临的问题和挑战,从个体信源编码和分布式信源编码 2 个方面深入探讨了近年国内外具有代表性的解决方案和理论研究成果。基于以上对各种视频编码算法的评价研究,WMSN 视频编码需要一个高效的、能够结合个体信源编码和分布式信源编码优点的方案,以满足其高压缩率、低复杂度和较强容错性的要求。各种编码方法之间的综合量化比较,面向 WMSN 的分布式信源编码测试平台和应用实例都是未来重要的研究方向。

## 参考文献:

- [1] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, *et al.* Wireless sensor networks: a survey[J]. *Computer Networks*, 2002, 38 (4): 393-422.
- [2] GURSES E, AKAN O B. Multimedia communication in wireless sensor networks[J]. *Ann Telecommun*, 2005, 60 (7-8): 799-827.
- [3] TORRES L, KUNT M. Video Coding: the Second-Generation Approach[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [4] CHIEN S Y, HUANG Y W, CHEN C Y, *et al.* Hardware architecture design of video compression for multimedia communication systems[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2005, 43(8): 123-131.
- [5] AKYILDIZ I F, MELODIA T, CHOWDHURY K R. A survey on wireless multimedia sensor networks[J]. *Computer Networks*, 2007, 51(4): 921-960.
- [6] KIMURA N, LATIFI S. A survey on data compression in wireless sensor networks[A]. *International Conference on Information Technology: Coding and Computing[C]*. Las Vegas, 2005. 8-13.
- [7] WU H, ABOUZEID A. Power aware image transmission in energy constrained wireless networks[A]. *Proceedings of the Ninth International Symposium on Computers and Communications[C]*. Alexandria, 2004. 202-207.
- [8] GHARAVI H, BAN K. Dynamic packet control for video communications over ad-hoc networks[A]. *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Communications[C]*. Paris, 2004. 20-24.
- [9] WANG Y, OSTERMANN J, ZHANG Y Q. Video Processing and Communications[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2002.



- [10] AKYILDIZ I F, MELODIA T, CHOWDHURY K R. Wireless multimedia sensor network: a survey[J]. *IEEE Transaction on Wireless Communication*, 2007, 14(6): 32-39.
- [11] MISRA S, REISSLEIN M, XUE G. A survey of multimedia streaming in wireless sensor networks[J]. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2008, 10(4): 18-39.
- [12] CHIASSERINI C, MAGLI E. Energy consumption and image quality in wireless video-surveillance networks[A]. *Proceedings of 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications[C]*. Lisbon, 2002. 2357-2361.
- [13] MAGLI E, MANCIN M, MERELLO L. Low complexity video compression for wireless sensor networks[A]. *Proceedings of 2003 International Conference on Multimedia and Expo[C]*. Baltimore, 2003. 585-588.
- [14] PEKHTERYEV G, SAHINOGLU Z, ORLIK P, *et al.* Image transmission over IEEE 802.15.4 and Zigbee networks[A]. *Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on Circuits and Systems[C]*. Kobe, 2005. 23-26.
- [15] FENG W, KAISER E, FENG W C, *et al.* Panoptes: scalable low-power video sensor networking technologies[J]. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications*, 2005, 1(2): 151-167.
- [16] MAMMERI A, KHOUMSI A, ZIOU D, *et al.* Energy-aware JPEG for visual sensor networks[A]. *The 2008 Maghreb Conference on Software Engineering and Artificial Intelligence[C]*. Oran, 2008. 1-7.
- [17] MAMMERI A, KHOUMSI A, ZIOU D, *et al.* Modeling and adapting JPEG to the energy requirements of visual sensor networks[A]. *2008 International IEEE Workshop on Sensor Networks[C]*. Virgin Islands, 2008. 1-6.
- [18] MAMMERI A, KHOUMSI A, ZIOU D, *et al.* Energy efficient transmission scheme of JPEG images over VSN[A]. *Proceedings of 2008 International IEEE Workshop on Performance and Management of Wireless and Mobile Networks[C]*. Montreal, 2008. 639-647.
- [19] LEE D, KIM H, TU S, *et al.* Energy-optimized image communication on resource-constrained sensor platforms[A]. *Proceedings of 6th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks[C]*. Cambridge, 2007. 216-225.
- [20] LEE D, KIM H, TU S, *et al.* Energy-efficient image compression on resource-constrained platforms[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, 18(9): 2100-2113.
- [21] WU M, CHEN C. Multiple bitstream image transmission over wireless sensor networks[A]. *Proceedings of IEEE Sensors[C]*. Toronto, 2003. 727-731.
- [22] YU W, SAHINOGLU Z, VETRO A. Energy efficient JPEG 2000 image transmission over wireless sensor networks[A]. *Proceedings of 2004 Global Telecommunications Conference[C]*. Dallas, 2004. 2738-2743.
- [23] WU H, ABOUZEID A. Power aware image transmission in energy constrained wireless networks[A]. *Proceedings of the Ninth International Symposium on Computers and Communications[C]*. Alexandria, 2004. 202-207.
- [24] LU Q, DU L, HU B. Low-power JPEG2000 implementation on DSP-based camera node in wireless multimedia sensor networks[A]. *Proceedings of 2009 International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing[C]*. Wuhan, 2009. 300-303.
- [25] SLEPIAN D, WOLF J. Noiseless coding of correlated information sources[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1973, 19(4): 471-480.
- [26] WYNER A. Recent results in the Shannon theory[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1974, 20(1): 2-10.
- [27] XIONG Z, LIVERIS A D, CHENG S. Distributed source coding for sensor networks[J]. *IEEE Signal Process Mag*, 2004, 21 (9): 80-94.
- [28] AARON A, ZHANG R, GIROD B. Wyner-Ziv coding of motion video[A]. *Proceedings of the Asilomar Conference on Signals and Systems[C]*. Pacific Grove, 2002. 240-244.
- [29] AARON A, RANE S, ZHANG R, *et al.* Wyner-Ziv coding for video: applications to compression and error resilience[A]. *Proceedings of 2003 IEEE Data Compression Conference[C]*. Snowbird, 2003. 93-102.
- [30] AARON A, SETTON E, GIROD B. Toward practical Wyner-Ziv coding of video[A]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing[C]*. Barcelona, 2003. 869-872.
- [31] GIROD B, AARON A, RANEAND S, *et al.* Distributed video coding[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2005, 93(1): 71-83.
- [32] ASCENSO J, BRITES C, PEREIRA F. Improving frame interpolation with spatial motion smoothing for pixel domain distributed video coding[A]. *Proceedings of the 5th EURASIP Conference Speech and Image Processing, Multimedia Communications and Services[C]*. Smolenice, 2005.1-6.
- [33] NATARIO L, BRITES C, ASCENSO J, *et al.* Extrapolating side information for low-delay pixel-domain distributed video coding[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2006, 3893(4): 16-21.
- [34] MORBEE M, NEBOT J P, PIZURICA A, *et al.* Rate allocation algorithm for pixel-domain distributed video coding without feedback channel[A]. *Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing[C]*. Honolulu, 2007. 521-524.
- [35] TAGLIASACCHI M, TRAPANESE A, TUBARO S, *et al.* Exploiting spatial redundancy in pixel domain Wyner-Ziv video coding[A]. *Proceedings of 2006 IEEE International Conference on Image Processing[C]*. Atlanta, 2006. 253-256.
- [36] AVUDAINAYAGAM A, SHEA J M, WU D P. Hyper-trellis decoding of pixel-domain Wyner-Ziv video coding[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2008, 18(5): 557-568.
- [37] XUE Z, LOO K K, COSMAS J, YIP P Y. Distributed video coding in wireless multimedia sensor network for multimedia broadcasting[J]. *WSEAS Transaction on Communications*, 2008, 5(7): 418-427.
- [38] AARON A, RANEAND S, SETTON E, *et al.* Transform-domain Wyner-Ziv codec for video[A]. *Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers-Visual Communications and Image Processing[C]*. San Jose, 2004. 520-528.
- [39] PURI R, RAMCHANDRAN K. PRISM: a new robust video coding

- architecture based on distributed compression principles[A]. Proceedings of 2002 Allerton Conference on Communication, Control, and Computing[C]. Allerton, 2002. 1-10.
- [40] PURI R, RAMCHANDRAN K. PRISM: an uplink-friendly multimedia coding paradigm[A]. Proceedings of 2003 International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing[C]. Hong Kong, 2003. 856-859.
- [41] PURI R, MAJUMDAR A, RAMCHANDRAN K. PRISM: a video coding paradigm with motion estimation at the decoder[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(10): 2436-2448.
- [42] BRITES C, ASCENSO J, PEDRO J Q, *et al.* Evaluating a feedback channel based transform domain Wyner-Ziv video codec[J]. Signal Processing: Image Communication, 2008, 23(3): 269-297.
- [43] BRITES C, PEREIRA F. Encoder rate control for transform domain Wyner-Ziv video coding[A]. Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Image Processing[C]. San Antonio, 2007. 5-7.
- [44] SHENG T, HUA G, GUO H, *et al.* Rate allocation for transform domain Wyner-Ziv video coding without feedback[A]. Proceedings of the 16th ACM International Conference on Multimedia[C]. Vancouver, 2008. 701-704.
- [45] MARTINS R, BRITES C, ASCENSO J, *et al.* Refining side information for improved transform domain Wyner-Ziv video coding[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2009, 19(9): 1327-1341.
- [46] BADEM M B, FERNANDO W A C, MARTINEZ J L, *et al.* An iterative side information refinement technique for transform domain distributed video coding[A]. Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Multimedia an Expo[C]. New York, 2009. 177-180.
- [47] ESMALI G R, COSMAN P C. Correlation noise classification based on matching success for transform domain Wyner-Ziv video coding[A]. Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing[C]. 2009. 801-804.
- [48] HUANG X, FORCHHAMMER S. Improved virtual channel noise model for transform domain Wyner-Ziv video coding[A]. Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing[C]. 2009. 921-924.
- [49] SKORUPA J, SLOWACK J, MYS S, *et al.* Accurate correlation modeling for transform-domain Wyner-Ziv video coding[A]. Proceedings of the 9th Pacific Rim Conference on Multimedia: Advances in Multimedia Information Processing[C]. 2008. 1-10.
- [50] BRITES C, PEREIRA F. Correlation noise modeling for efficient pixel and transform domain Wyner-Ziv video coding[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2008, 18(9): 1177-1190.
- [51] WAGNER R, NOWAK R, BARANIUK R. Distributed image compression for sensor networks using correspondence analysis and super-resolution[A]. Proceedings of 2003 IEEE International Conference on Image Processing[C]. Barcelona, 2003. 597-600.
- [52] WU M, CHEN C. Collaborative image coding and transmission over wireless sensor networks[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2007, (1): 223-232.
- [53] LU Q, LUO W, WANG J, *et al.* Low-complexity and energy efficient image compression scheme for wireless sensor networks[J]. Computer Networks, 2008, 52: 2594-2603.
- [54] FERNANDO P, LUIS T, CHRISTINE G, *et al.* Distributed video coding: selecting the most promising application scenarios[J]. Signal Processing: Image Communication, 2008, 23: 339-352.
- [55] RASHEED Z, CAO X, SHAFIQUE K, *et al.* Automated visual analysis in large scale sensor networks[A]. Proceedings of Second ACM/IEEE International Conference on Distributed Smart Cameras[C]. Stanford, 2008. 1-10.
- [56] JENS-RAINER O. Advances in scalable video coding[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(1): 42-56.
- [57] GOYAL V K. Multiple description coding: compression meets the network[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2001, 18(9): 74-93.
- [58] GOGATE N, CHUNG D M, PANWAR S, *et al.* Supporting image and video applications in a multi-hop radio environment using path diversity and multiple description coding[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2002, 12(9): 777-792.
- [59] BACCAGLINI E, BARRENETXEA G, LOZANO B B. Performance of multiple description coding in sensor networks with finite buffers[A]. Proceedings of 2005 IEEE International Conference on Multimedia and Expo[C]. Amsterdam, 2005. 1460-1463.
- [60] ZILAN R, ORDINAS J M B, TAVLI B. Image recognition traffic patterns for wireless multimedia sensor networks[A]. Proceedings of 4th International Workshop of the Euro FGI Wireless and Mobility[C]. Barcelona, 2008.49-59.

#### 作者简介:



樊晓平 (1961-), 男, 浙江绍兴人, 博士, 中南大学教授、博士生导师, 湖南财政经济学院副院长, 主要研究方向为机器人控制、智能控制、无线传感器网络、智能交通系统等。

熊哲源 (1982-), 男, 江西南昌人, 中南大学博士生, 主要研究方向为图像编码、无线传感器网络。

陈志杰 (1967-), 男, 江苏南通人, 中南大学博士生, 主要研究方向为无线传感器网络、铁路无线通信系统 (GSM-R) 等。

刘少强 (1964-), 男, 湖南南县人, 博士, 中南大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线传感器网络、传感器技术、测控技术。

瞿志华 (1963-), 男, 湖南长沙人, 博士, 美国中佛罗里达大学教授, 中南大学长江学者讲座教授, 主要研究方向为非线性系统理论、顽健与自适应控制、网络化系统控制、机器人等。