

## LBT Based Multi-Node Cooperative Image Compression Algorithm for WMSNs

LUO Wusheng, LU Qin\*, DU Liebo

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The main characteristic of Wireless Multimedia Sensor Networks (WMSNs) is nodes with limited energy, memory and computational power. Motivated by this, the concept of in-network processing has been proposed which greatly inspires the study of compression and transmission of big size and high resolution images in WMSNs. Based on the clustering architecture, the paper proposes a multi-node cooperative image compression algorithm based on LBT. In this algorithm, the low-complexity and high efficient LBT image compression algorithm is used, and multi-redirectors share the processing task of image compression and transmission. Simulation results show that the proposed image compression algorithm performs much better than JPEG2000 with higher PSNR and it greatly lightens the processing energy consumption burden on the camera-equipped node which leads to a longer network lifetime.

**Key words:** multimedia sensor networks; LBT (Lapped Biorthogonal Transform); multi-node cooperation; image compression algorithm

EEACC:6150

## 基于 LBT 的无线传感器网络多节点协同图像压缩算法

罗武胜, 鲁 琴\*, 杜列波

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 长沙 410073)

**摘 要:** 针对 WMSNs 能量、存储、处理能力严重受限的特点, 一些学者提出了“在网计算”的思想, 对实现 WMSNs 中大尺寸、高分辨率图像的压缩和传输极具指导意义。基于簇结构, 本文提出一种基于 LBT 的多节点协同图像压缩算法 (MCIC, Multi-node Cooperative Image Compression), 即采用低复杂度、高压缩效能的 LBT 图像压缩算法, 通过多个中继节点协作, 共同完成图像的压缩编码和转发任务。实验及仿真结果表明, 该多节点协同图像压缩算法在高压比情况下的重建图像质量远远优于 JPEG2000; 采用该方案能极大地缓解相机节点的能耗压力, 进而延长网络生命周期。

**关键词:** 多媒体传感器网络; LBT; 多节点协同; 图像压缩算法

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)09-1600-05

近年来, 随着无线传感器网络 (WSNs) 研究的逐渐升温和市场需求的推动, 无线多媒体传感器网络 (WMSNs) 技术的研究已引起了国内外科研人员的密切关注。除了一般 WSNs 的共性特点外, WMSNs 还具有处理任务复杂化、图像数据处理与传输能耗呈现“均匀”分布等特点<sup>[1]</sup>, 给 WMSNs 的研究和应用提出了巨大的挑战。和传统 WSNs 研究相比, WMSNs 的研究要滞后很多, 其相关理论和技术还非常不成熟, 还存在大量亟待解决的问题。尤其是图像信息处理已经成为制约 WMSNs 发展的一个瓶颈。

由于 WMSNs 节点处理能力有限, 单节点无法完成大尺寸、高分辨率图像的压缩处理, 迄今为止研究人员大多采用多个相机节点同时监测目标区域, 通过采集和传输多幅小尺寸、低分辨率、具有冗余信息的图像完成监测, 并针对此提出了基于 Slepian-Wolf 的分布式编码方案<sup>[2]</sup>。该方案要求图像传感器节点间的关联结构已知, 然而在大多数网络拓扑结构未知的应用场合, 通常很难得到各节点的联合概率模型和分布函数。姑且不论节点监测角度不同对该算法带来的影响, 耗费大量能量用于节点相关

性模型的建立显然不是明智之举。

对于大多数应用场合来说,如果能解决大尺寸、高分辨率图像的压缩和传输问题,在一个监测区域同一时间仅采用一到两个高分辨率相机节点处于活动状态,从不同角度通过获取大尺寸、高分辨率图像完成监视任务显然是有效并且节能的方法。迄今为止,该方面的研究还鲜有文献涉及。

针对 WMSNs 能量、处理能力严重受限的特点,一些学者提出了“在网计算”的思想<sup>[3]</sup>,对实现 WMSNs 中大尺寸、高分辨率图像的压缩和传输极具指导意义。基于此,本文提出一种基于 LBT 的多节点协同图像压缩算法 (Multi-node Cooperative Image Compression),即采用低复杂度、高压缩效能的 LBT 图像压缩算法,通过多个中继节点协作,共同完成图像的压缩编码和转发任务。实验及仿真结果表明,在多节点协同实现环境中,LBT 算法在高压压缩比情况下的重建图像质量远远优于 JPEG2000;采用该方案能极大地缓解相机节点的能耗压力,在节点部署较为密集时起到平衡网络能耗、延长网络生命周期的作用。

### 1 研究思路

结合 WMSNs 这一特殊应用,为了完成大尺寸、高分辨率图像的压缩和传输任务,我们认为主要需要解决以下两个问题:

WMSNs 能耗“均匀”分布的特殊性要求图像压缩算法同时具有低复杂度和高压缩效能。用高的复杂度来换取高的压缩效率,这对于计算能力和能耗都有限的传感器节点来说无疑是不可行的。因此,寻找一种适合于 WMSNs 节点实现的图像压缩算法成为首先要解决的问题。

前期的研究和分析结果<sup>[4]</sup>表明,传统 WSNs 的数据压缩策略并不适合于 WMSNs。如何通过 WMSNs 中的多个节点协同完成数据压缩任务,实现所谓的“在网计算”是 WMSNs 领域一个值得深入研究的问题。

本文将从这两个问题入手,将低复杂度、高压缩效能的图像压缩算法与多节点协同技术相结合,以期系统提高 WMSNs 的整体性能。

### 2 图像压缩算法分析

#### 2.1 JPEG2000 存在的不足

基于小波变换的 JPEG2000 压缩算法压缩性能良好,尤其是在大压缩比的自然景物图像数据压缩中,在恢复图像质量方面显示出其它方法不能比拟

的优势。然而,基于小波变换的压缩算法存在计算复杂度高、存储量急剧增加的问题。要将基于小波变换的压缩算法应用于 WMSNs 中,亟需解决的问题是降低计算复杂度和存储量要求。

为了减小所需的缓存大小,易于并行处理, JPEG2000 对源图像的预处理时,Part 1 将源图像划分成互不相交的矩形片 (tile),将每个矩形片当作独立的源图像进行编码。因此,在 WMSNs 中可采用划分 tile 的方式进行多节点协同实现。我们对该压缩算法进行了仿真。仿真结果表明,此方法存在如下不足:

虽然采用分 tile 方式进行处理,但对于处理能力和存储能力有限的传感器网络节点来说,对图像进行多级小波变换,其计算复杂度过高;

高压压缩比情况下会出现 tile 的边缘,图像质量较差。并且划分的 tile 越小,其块边缘效应越明显。

#### 2.2 LBT 图像压缩算法

鉴于 JPEG2000 计算复杂度高,其划分 tile 的方法在高压压缩比时图像质量较差,我们提出采用基于双正交重叠变换技术 (LBT, Lapped Biorthogonal Transform) 的图像压缩算法。该算法不仅消除了块边缘效应,并且计算复杂度低,能有效降低节点的处理能耗。图 1 给出了一维时域 binLBT 的实现流程。

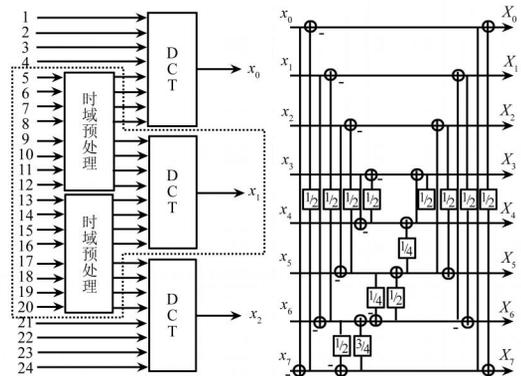


图 1 一维时域 binLBT 的实现流程

#### 2.2.1 算法描述

离散余弦变换 (DCT) 由于具有良好的去相关效果,并且存在相应的快速算法,应用广泛。然而,由于 DCT 存在严重的块效应现象,导致基于 DCT 的压缩算法图像质量很差。

针对块效应问题,LBT 技术被引入图像压缩中,其原理是实现信号的部分重叠处理。它具有两类典型的变换流程:一类是在 DCT 变换后的频域进行重叠变换,一类是在 DCT 前直接在时域进行重叠变换,常称为后处理和预处理<sup>[5]</sup>。

LBT 继承了 DCT 计算简便、存储需求低的特点,同时克服了 DCT 的块效应。为了进一步降低

对节点处理能力的要求,我们采用双正交叠式变换的快速整数实现算法(binLBT)<sup>[6]</sup>,所有系数均采用分母为2的幂、分子为整数的分数近似,从而整个变换过程只需要整数加法和位移运算。

### 2.2.2 任务分解方式

二维时域LBT传统上是按先行后列的顺序分别进行一维变换,这明显不适合WMSNs中多节点的协同实现。因此,我们重排了压缩算法的处理流程,得到如图2所示的任务分解方式,即将列预处理提出来先做,然后每8行独立出来进行列DCT以及每行的行LBT处理,最后对这8行的每个8×8的LBT系数块进行编码。

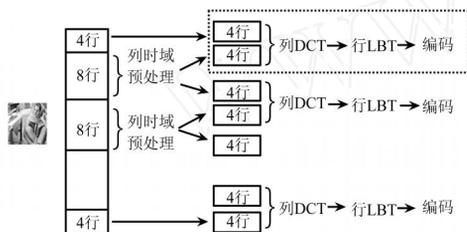


图2 LBT压缩算法任务分解

### 2.2.3 计算复杂度以及存储开销分析

#### (1) 计算复杂度

表1给出了几种不同变换在每个像素上的平均运算量。二进制LBT虽然比二进制DCT计算量略有增加,但相比于二进制CDF9/7而言,其计算复杂度大大减小。

表1 每比特平均计算量(次数)

项目性质	浮点		二进制		二进制
	DCT	CDF9/7	DCT	CDF9/7	
整数+	0	0	7.75	34.1	13
移位	0	0	3.5	23.6	6.7
浮点+	7.25	10.5	0	0	0
浮点×	3.25	7.9	0	0	0

#### (2) 存储开销

采用LBT图像压缩算法,所需要的存储开销非常小。设图像宽度为 $w$ ,相机节点只需同步缓存 $12w$ 个像素,即每次进行完8行图像数据的列预处理后,将这8行中的前4行与它的上面4行传输给中继节点,然后读入后面的8行图像数据继续进行列预处理操作。中继节点则每次只需同步缓存 $8w$ 个像素。而采用JPEG2000推荐的基于行变换的方法,5层小波变换需要缓存 $183w$ 个点。

## 3 多节点协同压缩算法(MCIC)

### 3.1 网络构建

本节解决的一个主要问题是如何建立起一个适

合于多节点协同工作的网络拓扑结构。首先,我们将网络节点划分为相机节点和普通节点,并假设:

网络中每个节点都有ID号,且所有节点静止,保持时间同步;

网络节点密度足够大,使得相机节点在无线通信链路的连通区域内其邻居节点集不为空。

为了减轻相机节点的能耗压力,让相机节点周边的多个普通节点协作完成图像压缩与传输任务,我们在普通簇结构上设计了以相机节点为簇头的虚拟簇。其网络拓扑建立过程如下(如图3所示)。

Step1 相机节点向外广播,由其连通区域内的邻居节点构成中继压缩处理节点集,形成以相机节点为簇头,中继处理节点为子节点的虚拟簇;

Step2 根据中继处理节点的数目,相机节点制定工作周期以及TDMA时刻表;

Step3 所有的普通节点采用LEACH算法形成簇,但中继处理节点不参与簇头的竞选。

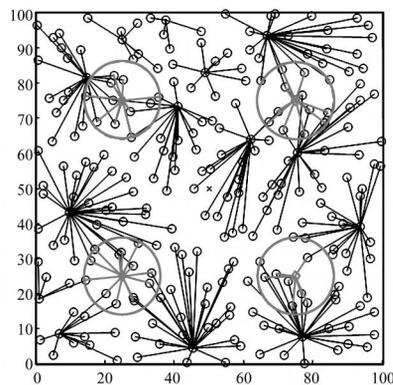


图3 网络拓扑结构

为了确保数据传输的可靠性,防止冲突,算法采用TDMA+FDMA的信道接入方式,即普通簇与虚拟簇采用不同的频段进行通信,两种簇内部均采用TDMA方式。除此外,普通簇内部采用重传机制防止丢包;虚拟簇内,为了避免因丢包重传原始图像数据带来的能量损耗,我们根据链路稳定性模型,设计所有中继处理节点处于相机节点的连通区域内,确保不会因链路不稳定引起丢包。

### 3.2 算法描述

基于上节构建的网络拓扑结构,我们设计了基于LBT的多节点协同图像压缩算法(MCIC)。如图4所示,相机节点主要负责图像采集以及图像数据的列时域预处理,然后以每8行为一个单元Data,将数据传输至中继节点;中继节点负责进行后面的压缩处理,主要包括列DCT、行时域预处理、行DCT以及 $8 \times 8$ LBT系数块的编码。最后将压缩后的码流汇聚到簇头节点。

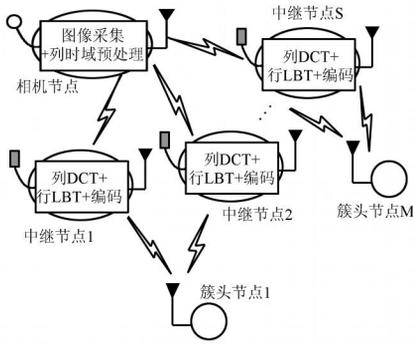


图 4 基于 LBT 的多节点协同压缩算法

在稳定工作阶段, 中继处理节点参与协同图像压缩与传输的具体过程描述如下:

Step1 中继节点工作在自己所在的普通簇内, 根据普通簇的 TDMA 时刻表, 以  $F_1$  频率收发缓存数据;

Step2 到达相机节点规定的工作时刻, 属于该虚拟簇的所有中继节点从  $F_1$  频率切换到  $F_2$  频率, 侦听相机节点是否有数据传输请求, 没有则跳转回 Step1;

Step3 中继节点发送 1bit 响应应答, 告知相机节点准备好开始接收;

Step4 相机节点对数据单元 Data 按顺序添加上标识符, 根据 TDMA 时刻表发送。然后相机节点判断是否还有数据包没有发送完, 是则继续以  $F_2$  频率发送数据传输请求命令;

Step5 中继节点在其规定时隙接收由它处理的 Data 单元, 进行压缩编码, 然后缓存;

Step6 到达相机节点规定的下一工作时刻, 中继节点继续侦听相机节点是否有数据传输请求, 没有则跳转回 Step1, 有则跳转到 Step3。

### 4 仿真实验

#### 4.1 重建图像质量

基于 LBT 多节点协同图像压缩算法的提出, 除了其具有低计算复杂度和低存储要求外, 最主要的是在 WMSNs 中多节点协同实现环境下, 高压缩比时其图像质量远远优于 JPEG2000 的分片压缩编码。我们采用  $512 \times 512 \times 8$  的灰度图像进行实验。相机节点若使用 LBT 算法, 中继节点每次接收到  $8 \times 512$  个像素的数据, 这相当于采用 JPEG2000 时每次向中继节点传输  $64 \times 64$  像素的分块。图 5 给出了目标码率分别为 0.1 bpp 和 0.25 bpp 时的图像质量对比。由图可见, 不管是用峰值信噪比 (PSNR 值) 还衡量, 还是采用主观评价, LBT 算法都更加适合于 WMSNs 中高压缩比时的多节点协

同实现。



图 5 两种算法图像质量对比

#### 4.2 能量消耗

无线多媒体传感器网络中能耗可分为三部分: 数据采集能耗、无线收发能耗和数据处理能耗。本实验中我们主要考虑后两项。

我们首先在 StrongARM-1100 处理器平台上运行 LBT 图像压缩算法, 得到了预处理、DCT、编码三个部分在每个像素上的平均运行时钟周期, 然后采用如下模型<sup>[7]</sup>对能耗进行计算:

$$E = N \times C \times V_{dd}^2$$

其中  $N$  为完成某个处理任务所占用的时钟周期数,  $C$  为周期转换电容, 一般取  $0.67 \text{ nF}$ ,  $V_{dd}$  为处理器供电电压。

得到能耗:  $E_{pre} = 15 \text{ nJ/bit}$ ;  $E_{DCT} = 20 \text{ nJ/bit}$ ;  $E_{code} = 90 \text{ nJ/bit}$ 。

无线收发能耗我们采用如下模型<sup>[8]</sup>:

$$E_{Tx} = k \cdot E_{elec} + k \cdot f_s \cdot d^2$$

$$E_{Rx} = k \cdot E_{elec}$$

其中,  $E_{elec}$  是传输和接收器线路的能量消耗,  $d$  为传输距离。一般取  $E_{elec} = 50 \text{ nJ/bit}$ ,  $f_s = 100 \text{ pJ/bit/m}^2$ 。

考虑 250 个节点随机分布在一个  $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$  的矩形区域中。选择最靠近矩形区域中心的节点作为相机节点, 基站位置为  $(0, 0)$ , 连通区域半径为  $11 \text{ m}$ 。每个节点的初始能量为  $4 \text{ J}$ 。LEACH 算法中的  $P_{opt} = 0.06$ 。相机节点周期性地采集  $512 \times 512 \times 8$  的灰度图像, 以目标码率为  $0.25 \text{ bpp}$  进行压缩, 然后传输至基站。通过 Matlab 对两个方案进行了仿真。

方案 1 相机节点压缩图像, 通过最近的簇头转

发压缩数据至基站;

方案2 本文提出的多节点协同压缩方案。

图6分别给出了采用两种方案经过相同时间后节点能量消耗分布图。很明显,本文提出的多节点协同压缩方案极大地缓解了相机节点的能耗压力,很好地平衡了网络节点能耗,进而起到延长网络生命周期的作用。

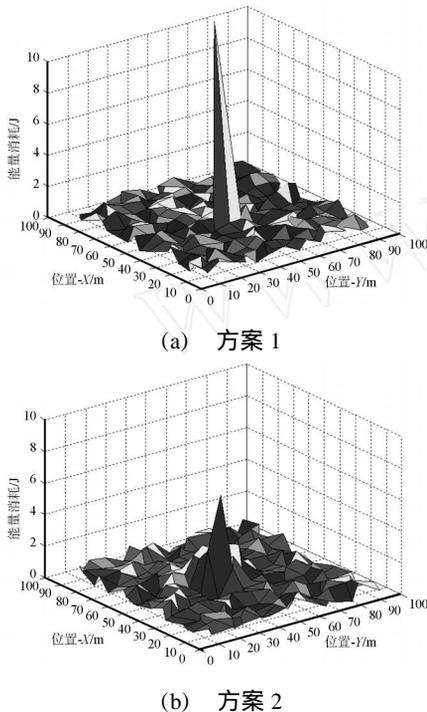


图6 节点能量消耗分布图

## 5 结论

结合“在网计算”的思想,本文提出一种基于LBT的多节点协同图像压缩算法。首先在分析JPEG2000压缩标准在WMSNs多节点协同实现中存在的不足的基础上,提出采用低计算复杂度、高压

缩效能的LBT图像压缩算法。该算法在DCT变换前通过时域重叠变换,消除了块效应,同时还具有计算简便、存储需求低的特点。通过构建适合于多节点协同处理的网络拓扑结构,以及重排二维时域LBT变换及编码的处理流程,提出了一种适合于WMSNs多节点协同实现的图像压缩方案。实验仿真结果显示,在多节点协同实现环境中,LBT算法在高压缩比情况下的重建图像质量远远优于JPEG2000;采用该方案能极大地缓解相机节点的能耗压力,起到延长网络生命周期的作用。

## 参考文献:

- [1] Petkov Margi V, Obraczka K, Manduchi R, Characterizing Energy Consumption in a Visual Sensor Network Testbed [C]// Proc of IEEE/ Create-Net Intl. Conf. on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities (Trident-Com), Barcelona, Spain, March 2006.
- [2] Pradhan S, Kusuma J, Ramchandran K, Disrebuted Compression in a Dence Microsensor Network [J], IEEE Signal Process. Mag, 2002(19):51-60.
- [3] Chiasserini C F, On the Concept of Distributed Digital Signal Processing in Wireless Sensor Networks [C]// Proc of IEEE Military Communications Conference (MILCOM '02), 2002: 260-264.
- [4] 鲁琴, 罗武胜, 张勇, 多媒体传感器网络中基于两跳簇结构的图像传输方案[J], 传感技术学报, 2007(20)11:2476-2480.
- [5] Tran T D, Liang J, Tu C J, Lapped Transform Via Time-Domain Pre- and Post-Filtering [J], IEEE Trans. Signal Processing, 2003(51): 1557-1571.
- [6] Zeng Y H, Cheng L Z, Bi G A, Kot A C, Integer DCTs and Fast Algorithms [J], IEEE Trans. Signal Processing, 2001(49):2774-2782.
- [7] Wang A, Chandrakarasan A, Energy Efficient DSPs for Wireless Sensor Networks [J], IEEE Signal Proc. Magazine, July 2002:68-78.
- [8] Heinzelman W B, Application-specific protocol architectures for wireless networks [D], Ph. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, June 2000.



罗武胜(1972-),男,博士,国防科技大学机电工程与自动化学院副教授。主要研究领域为现代传感技术与系统



杜列波(1980-),男,2002年毕业于天津大学获学士学位,2004年在国防科技大学获得硕士学位,现为国防科技大学博士研究生,主要研究领域为图像压缩与实现。



鲁琴(1980-),女,分别于2002年和2004年在国防科技大学获得学士和硕士学位,现为国防科技大学博士研究生。主要研究领域为无线传感器网络,网络资源分配与优化, freda0126@gmail.com