

文章编号 1004-924X(2010)01-0240-08

无线传感网基于邻居簇的 JPEG2000 多节点协同实现

鲁 琴, 罗武胜, 胡 冰

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:针对无线传感器网络能量、存储、处理能力严重受限的特点,基于“在网计算”的思想,结合 JPEG2000 算法流程以及无线传感器网络的网络拓扑结构特点,提出一种基于邻居簇的 JPEG2000 多节点协同图像压缩方法。首先,将相机节点采集的图像分片,并根据图像的梯度幅度值进行压缩比特率的自适应优化分配。然后,将压缩任务转移到多个邻居簇内,以最小化网络总能耗为目标,由多节点协作共同完成图像压缩和传输。仿真结果表明,该方法不仅使无线传感器网络中实现大尺寸图像的 JPEG2000 编码成为可能,且相机节点能耗仅为压缩图像后传输至基站方案的 3.4%,极大地平衡了网络节点能耗,使网络生命周期提高了 7 倍以上。

关 键 词:无线传感器网络;图像压缩;JPEG2000;多节点协同

中图分类号:TN919.8 **文献标识码:**A

Multi-node cooperative JPEG2000 implementation based on neighbor clusters in wireless sensor networks

LU Qin, LUO Wu-sheng, HU Bing

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

Abstract: In combination of the characteristic of JPEG2000 and the network architecture of Wireless Sensor Networks (WSNs), a multi-node cooperative JPEG2000 image compression method based on neighbor clusters is proposed by using the concept of in network processing to improve their energy, meomory and computational power. Firstly, the images captured by the camera node are partitioned into tiles and the adaptive bit rate is allocated by a optimum method based on gradient magnitudes. Then the tiles are sent to the neighbor clusters and compressed by multiple nodes cooperatively to minimize the total energy consumption of the network. Simulation results show that the proposed image compression method not only realizes the JPEG2000 compression of big size images in the WSNs, but also balances the energy load among all nodes. Compared with the compressing image before sending it to the base station, the proposed method has decreased the energy consumption of the camera node to 3.4%. These results show that the lifetime period of the network has improved by 7 times.

Key words: wireless sensor network; image compression; JPEG2000; multi-node cooperation

收稿日期:2009-01-20;修订日期:2009-02-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60872151)

1 引言

近几年,随着无线传感器网络研究的逐渐升温和市场需求的推动,无线传感器网络已被应用到视频监控中,无线多媒体传感器网络应运而生^[1]。典型的无线多媒体传感器网络一般由大量采集简单环境数据(如温度、振动等)的普通节点和具有图像采集功能的相机节点构成,除了一般无线传感器网络的自组织、多跳路由、资源受限等共性特点^[2-3]外,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^[4],给其研究和应用提出了巨大的挑战。

对于传统无线传感器网络来说,同一区域内多个节点采集数据往往存在大量冗余,因此需要采用网内数据融合的方法以减小数据传输能耗。基于此思想,为了减小图像数据传输能耗,一些学者针对无线多媒体传感器网络中多相机节点采集图像间存在重叠的情况,提出了基于 Slepian-Wolf 的分布式编码^[5]以及交换图像轮廓信息等方案^[6]。这些方案在图像间存在大量重叠时能有效减少传输的数据量,节能作用明显。然而,在实际应用中,不仅节点很难有效判定图像重叠部位,而且重叠图像的采集和处理会大量耗费能源。因此,对于大多数应用场合来说,为了节约成本和能耗,更多时候会考虑一个区域同一时间只有一到两个相机节点处于活动状态,来从不同角度获取大尺寸、高分辨率图像完成监视任务。因此,网络设计的主要压力集中到了对大尺寸、高分辨率图像的传输上,需要考虑的问题主要有两个方面:

(1)当相机节点距离基站较远时,很显然在传输前对图像进行压缩能极大地减小网络传输能耗,进而减小网络总能耗。而当相机节点距离基站较近时,初步研究结果表明,由于图像压缩本身要消耗大量能量,对图像进行压缩后传输并不会使网络的总能耗减小^[7]。因此,如何自适应地调整传输策略以最小化网络能耗成为需要解决的问题之一。

(2)将图像采集、压缩编码和传输全部集中在单个相机节点上,不仅增加了其存储、处理压力,还会导致其能量瞬间耗尽。如何通过多节点协同完成图像传输任务以平衡网络能耗分布,最大化网络生命周期成为关键问题所在。

针对无线传感器网络能量、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,对实现无线传感器网络中大尺寸、高分辨率图像的压缩和传输极具指导意义。基于此,本文结合 JPEG2000 算法以及无线传感器网络的网络拓扑结构特点,提出一种基于邻居簇的 JPEG2000 多节点协同图像压缩方法。该方法实现了:(1)当基站处于相机节点连通区域外时,相机节点将采集图像分片,然后将压缩和传输任务转移到多个邻居簇内,由多节点协作共同完成,极大地缓解相机节点的能耗压力;(2)由邻居簇头节点根据其到基站的距离,以最小化网络总能耗为目标,自适应地选择图像传输策略;(3)结合人眼视觉特征,根据反映图像边缘信息的梯度幅度值进行图像片压缩比特率的自适应优化分配,得到了较好的重建图像质量。仿真结果表明,该多节点协同实现方法使在无线多媒体传感器网络中实现大尺寸图像的 JPEG2000 编码成为可能,且极大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。

2 预备工作

2.1 JPEG2000 算法分析

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, JPEG2000 存在计算复杂度高、存储量急剧增加的问题,要将其应用于无线传感器网络中,亟需解决的问题是降低计算复杂度和存储量要求。

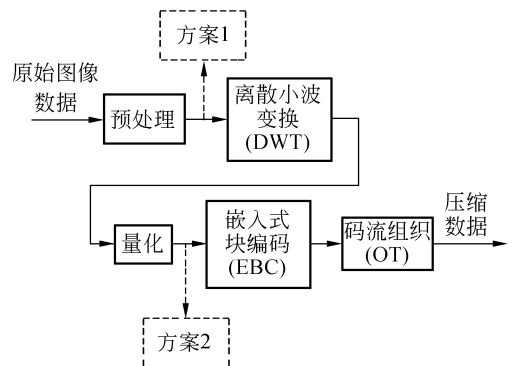


图1 JPEG2000 编码实现流程

Fig. 1 General coding flow of JPEG2000

JPEG2000 编码实现框图如图 1 所示。原始图像数据经正向预处理后进行离散小波变换 (DWT), 对变换后的 DWT 系数实施量化, 再进行嵌入式块编码 (EBC), 最后根据率失真优化原则, 对 EBC 编码后的数据流进行优化截取, 组织成不同的质量层。

为利用多节点协同实现 JPEG2000, 需要将 JPEG2000 算法分解成有利于同时解决的离散部分。在 JPEG2000 实现的过程中, 有两个环节有机会将数据进行拆分, 即存在两种拆分方案:

方案 1: 可将原始图像划分成互不相交的矩形片 (tile), 每个矩形片当作独立的源图像进行编码。

方案 2: 离散小波变换后的小波系数将被分割成码块 (code-block), 每个码块独立编码。

很显然, 如果采用方案 1 对数据进行拆分, 可以实现最大程度的多节点并行处理。然而, 在高压比情况下, 方案 1 将带来明显的边缘效应, 降低了重建图像质量。

通过对算法 (采用 5 级小波变换) 计算复杂度的分析发现, EBC 编码是 JPEG2000 实现中最复杂的部分, 耗时占 50% 以上 (图 2)。可见, 方案 2 也不失为一种降低节点计算复杂度的可用选择。然而, 采用方案 2, 需要有一个节点承担原始图像数据的离散小波变换和量化任务。

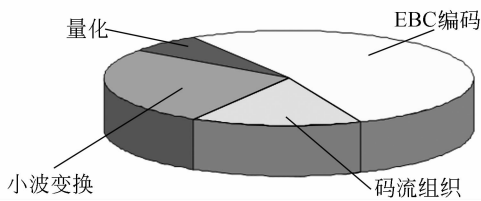


图 2 JPEG2000 编码耗时分布图

Fig. 2 Illustration of run time of JPEG2000

通过上述分析, 综合考虑到重建图像质量和计算复杂度, 可以将方案 1 和方案 2 相结合, 即先采用方案 1 在一定程度上降低节点的存储压力, 然后采用方案 2 降低计算复杂度。

2.2 无线传感网拓扑结构分析

多节点协同图像压缩的实现基础是具有广泛适应性和良好扩展性的网络体系结构。目前, 无线传感器网络大多采用单级的平面结构或基于簇的分层结构。

2.2.1 平面结构

在平面结构中, 所有传感器节点结构相同, 功能相同, 地位平等。节点采集的数据根据一定的路由算法通过临近的其它节点以“多跳”的方式传输至汇聚节点。这种结构的优点是结构简单, 部署方便, 不存在分层结构中“簇头”节点快速死亡的问题; 缺点是所有传感器节点同构, 适应性和可扩展性差, 临近基站的节点死亡速度快, 一般只能应用于特定的单任务场合中。

2.2.2 基于簇的分层结构

在分簇的拓扑管理机制下, 网络中的节点可以划分为簇头节点和成员节点两类。在每个簇内, 根据一定的机制算法选取某个节点作为簇头, 用于管理和控制整个簇内成员节点, 协调成员节点之间的工作。这种结构的优点是功能明确, 便于管理, 可满足任务多样化的需求, 网络可扩展性好, 缺点是簇头可能会成为网络的“瓶颈”。

对于平面拓扑结构来说, 只有单连通度的网络很难支持多节点协同工作, 而具有多连通度的网络也不一定适合多节点协同。相对于平面结构而言, 基于簇的分层结构便于多节点的管理和任务分配, 更适合于本文中多节点协同图像压缩的需求。

2.3 能耗模型

无线多媒体传感器网络中能耗可分为 3 部分: 数据采集能耗、无线收发能耗和数据处理能耗。本文中我们主要考虑后两项。

无线收发能耗我们采用如下模型^[8]:

发送能耗

$$E_{Tx}(k, d) = E_{Tx-elec}(k) + E_{Tx-amp}(k, d) = \begin{cases} k \cdot E_{elec} + k \cdot \epsilon_{fs} \cdot d^2, & d < d_0 \\ k \cdot E_{elec} + k \cdot \epsilon_{mp} \cdot d^4, & d \geq d_0 \end{cases}, \quad (1)$$

接收能耗

$$E_{Rx}(k) = E_{Rx-elec}(k) = k \cdot E_{elec}, \quad (2)$$

其中: E_{elec} 是传输和接收器线路的能量消耗, 依赖于电路如数字编码、模型、滤波器等。放大器的能量消耗 $\epsilon_{fs} d^2$ 和 $\epsilon_{mp} d^4$ 在可接受的容错率下依赖于传输的距离。一般情况下, $E_{elec} = 50 \text{ nJ/bit}$, $\epsilon_{fs} = 10 \text{ pJ}/(\text{bit} \cdot \text{m}^2)$, $\epsilon_{mp} = 0.0013 \text{ pJ}/(\text{bit} \cdot \text{m}^4)$, 以及 $d_0 = 87 \text{ m}$ 。

数据处理部分采用如下模型^[9]对能耗进行计算:

$$E = NCV_{dd}^2, \quad (3)$$

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 nF , V_{dd} 为处理器供电电压。

在 StrongARM-1100 处理器平台运行 JPEG2000 图像压缩算法程序(采用 5 级小波变换),得到了 DWT、量化、EBC 编码和码流组织四个部分在每个像素上的平均运行时钟周期,取 $V_{\text{dd}}=3.3 \text{ V}$,采用公式(3)计算得到能耗如表 1 所示。

表 1 JPEG2000 能耗

Tab. 1 Energy consumption of JPEG2000

任务	时钟周期/(clock/pixel)	能耗/(nJ/bit)
DWT	388.8	354.6
量化	95.37	86.98
EBC 编码	762.94	695.83
码流组织	220.08	200.72

3 基于邻居簇的 JPEG2000 多节点协同图像压缩方法

结合 JPEG2000 算法流程以及无线传感器网络的网络拓扑结构特点,本文提出一种基于邻居簇的 JPEG2000 多节点协同图像压缩方法。

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实现 JPEG2000 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:

1. 网络中每个节点都有 ID 号,且所有节点静止,保持时间同步;
2. 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。根据链路稳定性模型^[10],连通区域内($d=11 \text{ m}$)的包传输是可靠的(包接收率 $\text{PRR} \approx 100\%$)。

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能协作完成 JPEG2000 图像压缩任务,结合上节中分析的 JPEG2000 拆分方案,我们采用构建邻居簇的方式(如图 3 所示)。其建立过程如下:

1. 相机节点根路连通区域内的邻居节点集

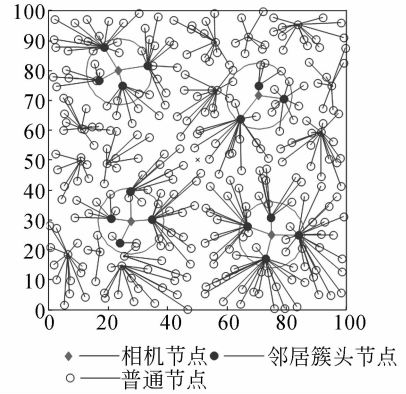


图 3 网络结构

Fig. 3 Network constructure

内节点的剩余能量信息,依某概率推选邻居簇头节点;

2. 除了相机节点和其连通区域内的邻居节点集,其它普通节点依据能量、稳定性等条件,以某概率推选自己为簇头节点;

3. 所有簇头节点广播通知周围节点,自己为簇头节点;

4. 非簇头节点(相机节点除外)自行选择自己所属的簇,并通知簇头节点;

5. 簇头节点保留一张簇内节点的 id 列表;

6. 步骤 1~5 不定范围、不定期的重复一遍。

与基于 LEACH 协议^[11]的网络拓扑构造算法相比,本构造算法确保了在相机节点的连通区域邻居节点集内,存在一定数目的簇头节点,以形成参与分布式计算的邻居簇。这里,将范围限定在连通区域内,是为了避免因丢包重传原始图像数据带来的能量损耗。

为了确保数据传输的可靠性,防止冲突,算法采用如下通信协议:

1. 相机节点与邻居簇头节点采用 F1 频率,以 TDMA 方式实现通信;
2. 所有簇头节点与其子节点采用 F2 频率,以 TDMA 方式实现通信;
3. 簇间采用 CDMA 方式避免冲突。

3.2 算法描述

基于上节构建的网络拓扑结构,我们设计了基于邻居簇的 JPEG2000 多节点协同图像压缩方

法。算法中包括以下几类节点:基站 P , 相机节点 S 、邻居簇头节点 C_i 和编码节点 T_{ik} , 如图 4 所示。

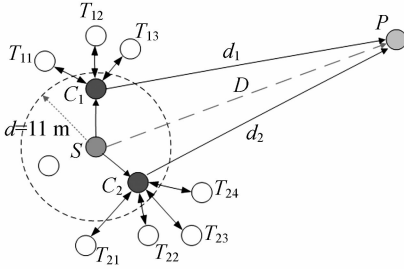


图 4 多节点协同图像压缩

Fig. 4 Multi-node cooperative image compression

假设相机节点 S 距离基站 P 的距离为 D , 邻居簇头节点 C_i 距离基站 P 的距离为 d_i , 图像大小为 $N_1 \times N_2 \times 8$ 比特, 在满足图像质量要求情况下的最小压缩比特率为 Br , 压缩及传输实现过程如下:

1. 相机节点 S 负责图像采集、预处理。当基站处于相机节点连通区域内时, 相机节点将图像直接传输至基站; 当基站处于相机节点连通区域外时, 相机节点首先将采集的图像划分成 M 个 tile。

结合人眼视觉特征, 根据反映图像边缘信息的梯度幅度值定义:

$$G(i) = 1 + \left\{ \frac{1}{(n_1 - 1)(n_2 - 1)} \sum_{x=1}^{n_1 - 1} \sum_{y=1}^{n_2 - 1} g(x, y)^2 \right\}^{1/2}, \quad (4)$$

其中, tile 的大小为 $n_1 \times n_2$, 采用简单的交叉差分法表征图像像素点 (x, y) 的梯度幅度值:

$$g(x, y) = |f(x, y) - f(x + 1, y + 1)| + |f(x + 1, y) - f(x, y + 1)|, \quad (5)$$

定义压缩比特率分配权重:

$$\omega_i = \frac{G(i)}{\sum_{i=1}^M G(i)}, \quad (6)$$

然后, 进行 tile 压缩比特率 br_i ($i = 1, 2, \dots, M$) 的自适应优化分配:

$$br_i = \omega_i \times M \times Br, \quad (7)$$

这样, 含有较多图像边缘信息的 tile 将获得较大的压缩比特率。

然后将图像 tile 和 br_i 传输给邻居簇头节点 C_i 。

2. 接收到图像 tile 的邻居簇头节点 C_i 计算直接传输图像 tile 至基站 P 的能耗:

$$E_1 = E_{Tx}(8N_1N_2/M, d_i), \quad (8)$$

以及采用如下步骤 4 至步骤 6 的多节点协同压缩并传输压缩码流至基站所需能耗:

$$E_2 = 8N_1N_2(E_{DWT} + E_Q + E_{OT})/M +$$

$$E_{Tx}(16N_1N_2/M, d) + E_{Rx}(16N_1N_2/M) + E_{Tx}(br_iN_1N_2/M, d_i), \quad (9)$$

其中, 第一部分为图像小波变换、量化及优化截断能耗, 第二、三部分为邻居簇头节点 C_i 与编码节点 T_{ik} 数据交换能耗, 第四部分为传输压缩码流至基站能耗;

3. 邻居簇头节点 C_i 比较 E_1 和 E_2 。如果 $E_1 > E_2$, 则进入步骤 4, 否则直接传输图像 tile 至基站;

4. 邻居簇头节点 C_i 对该 tile 数据进行小波变换和量化, 采用定点实现方法, 用 16 位 short 型数据存储最终小波变换系数, 然后将小波系数分割成 code-block 传输给簇内成员, 即编码节点 T_{ik} ;

5. 编码节点 T_{ik} 对接收到的 code-block 完成 EBC 算法, 然后将编码后的数据返回给邻居簇头节点 C_i ;

6. 邻居簇头节点 C_i 汇总 EBC 编码后的数据流进行优化截取, 以码率 br_i 传输至基站。

4 性能分析

4.1 重建图像质量

本文提出的算法中, 图像 tile 的大小, 或者说是 tile 的数目 M , 直接影响邻居簇头节点 C_i 的计算和存储压力。 M 越大, C_i 的处理压力越小。然而, 随着 M 的增加, tile 单独处理所带来的失真及边缘效应也增加了。

图 5 给出了采用 5 级小波变换, 不同 M 和不同压缩比特率方案下的重建图像。图 5(a) 和 (b) 中 tile 大小分别为 $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$ 和 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$, 每个 tile 分配相同的压缩比特率。图 5(c) 和 (d) 中 tile 大小也分别为 $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$ 和 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$, 每个 tile 根据公式 (7) 分配不同的压缩比特率。根据 PSNR 值和主观评价可以看出: 为了避免较大失真, 算法中 M 的取值应该在 C_i 的处理能力范围内尽量小。此

外,采用图像片压缩比特率自适应优化分配策略后,重建图像的 PSNR 提高了 2 dB。



(a) tile=64 pixel×64 pixel, $M=64$, $Br=0.25$ bpp, PSNR=31.65 dB
(b) tile=128 pixel×128 pixel, $M=16$, $Br=0.25$ bpp, PSNR=33.74 dB



(c) tile=64 pixel×64 pixel, $M=64$, $Br=0.25$ bpp, PSNR=32.15 dB
(d) tile=128 pixel×128 pixel, $M=16$, $Br=0.25$ bpp, PSNR=34.38 dB

图 5 重建图像对比

Fig. 5 Comparison of reconstructed images

4.2 能量消耗

考虑 1 000 个节点随机分布在一个 $250\text{ m} \times 250\text{ m}$ 的矩形区域中。基站位置为 $(0,0)$, 连通区域半径为 11 m。相机节点周期性地采集 $512 \times 512 \times 8$ 的灰度图像, $Br=0.25$ bpp, $M=16$ 。

对于整个监测区域来说,相机节点比普通传感节点具有更重要的地位。因此,我们首先分析在如下 4 种方案下,相机节点将图像传输至基站的能量消耗。

方案 1: 相机节点直接将原始图像传输至基站;

方案 2: 相机节点压缩图像,然后将压缩码流传输至基站;

方案 3: 相机节点压缩图像,然后将压缩码流传输给连通半径内的邻居簇头,由邻居簇头转发至基站;

方案 4: 相机节点将原始图像传给连通半径

内的邻居簇头,由邻居簇头负责将图像传输至基站。

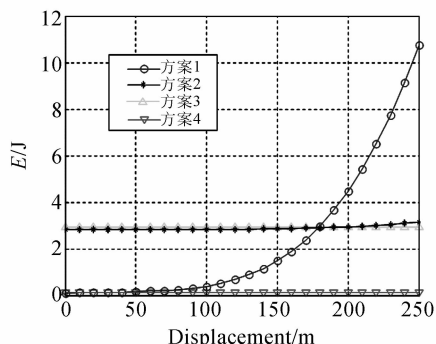


图 6 相机节点能量消耗

Fig. 6 Energy consumption of camera node

图 6 给出了 4 种方案下相机节点传输一幅图像的能量消耗与相机节点至基站距离的关系。从图中可以看出,当基站处于相机节点连通区域内时,直接传输图像至基站最为节能,随着相机节点与基站的距离增大,直接传输原始图像会使相机传输能耗显著增加。而采用传输前先对图像进行压缩的方案,无论相机节点距离基站远近,图像压缩任务是相机节点的主要能耗来源。很显然,当基站处于相机节点连通区域外时,采用多节点协同图像压缩方案极大地降低了相机节点的能量消耗。在相机节点距离基站 250 m 时,相机节点采用方案 4 消耗的能量仅分别为前 3 种方案的 1%, 3.4% 和 3.7%。

其次,我们对在如下 4 种方案下邻居簇头节点的能耗进行了仿真。

方案 1: 邻居簇头节点直接将接收到的图像 tile 发送至基站;

方案 2: 邻居簇头节点压缩图像 tile,然后将压缩码流发送至基站;

方案 3: 邻居簇头节点不判断它与基站距离关系带来的能耗影响,直接采用簇内多节点协同实现图像压缩,然后将压缩码流发送至基站;

方案 4: 邻居簇头节点采用本文提出的方法。

图 7 给出了 4 种方案下邻居簇头节点传输一个图像 tile 的能量消耗与它至基站距离的关系。可以看出,在邻居簇头节点距离基站很近时,直接传输原始图像 tile 比较节能;随着邻居簇头节点与基站距离的增加,直接传输原始图像 tile 会导致能耗大幅增加,这时应采用簇内多节点协

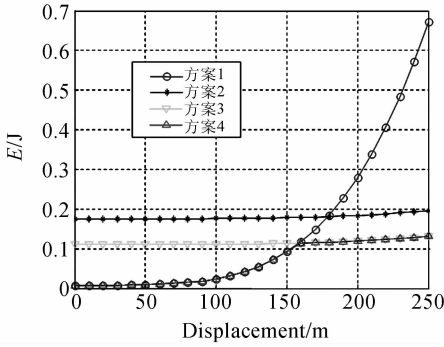
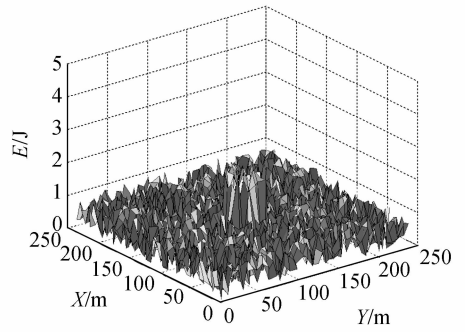


图 7 邻居簇头节点能量消耗

Fig. 7 Energy consumption of neighbor cluster head



(b)方案 2

(b) Mothed 2

同实现图像压缩。显然,对于邻居簇头节点来说,本文提出的方案 4 是最节省能量的。

最后,我们选择最靠近矩形区域中心的节点作为相机节点,对如下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码流至基站;

方案 2:本文提出的多节点协同压缩方法。

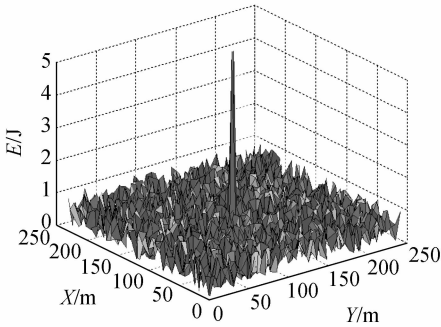
以基站接收到 1 幅图像为 1 轮。图 8(a)为采用方案 1 在经过 2 轮后节点能量消耗分布图。相机节点的能耗远远高于其它节点。图 8(b)为采用方案 2 在经过 15 轮后节点能量消耗分布图。很明显,方案 2 极大地平衡了网络节点能耗,使网络生命周期提高了 7 倍以上。

图 8 节点能量消耗分布图

Fig. 8 Distribution of sensor nodes' energy consumption

5 结 论

为了实现无线传感器网络中大尺寸、高分辨率图像的传输,在分析 JPEG2000 图像压缩算法拆分方案和无线传感器网络拓扑结构的基础上,结合“在网计算”的思想,提出一种基于邻居簇的 JPEG2000 多节点协同图像压缩方法,即将相机节点采集的图像分片,并结合人眼视觉特征,根据反映图像边缘信息的梯度幅度值进行图像片压缩比特率的自适应优化分配,然后将压缩任务转移到多个邻居簇内,由邻居簇头节点根据其到基站的距离,以最小化网络总能耗为目标,自适应地选择图像传输策略。当需要对图像进行压缩时,邻居簇头节点负责压缩算法中的小波变换、量化和最后的优化截断,簇内其它节点负责 EBC 编码。仿真结果表明,在保证一定重建图像质量情况下,该方法能极大地缓解相机节点的能耗压力,平衡网络节点能耗,使网络生命周期提高了 7 倍以上。



(a)方案 1

(a) Method 1

参考文献:

[1] 罗武胜, 翟永平, 鲁琴. 无线多媒体传感器网络研究 [J]. 电子与信息学报, 2008, 30(6): 1511-1516.
 LUO W SH, ZHAI Y P, LU Q. Study on wireless

multimedia sensor networks [J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2008, 30(6): 1511-1516. (in Chinese)
 [2] 付耀先, 姜华, 刘海涛. 基于无线传感网扩频通信的跨层 CSMA 多用户接入 [J]. 光学精密工程,

2008,16(2):325-332.

FU Y X, JIANG H, LIU H T. Cross-layer CSMA multi-user access based on spreading communication system in wireless sensor network [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(2):325-332. (in Chinese)

- [3] 马奎,黄河清,沈杰,等. 基于混合汇聚节点的无线传感器网络数据收集方法[J]. *光学精密工程*, 2008,16(9):1752-1758.
- MA K, HUANG H Q, SHEN J, *et al.*. A data collection method with hybrid sinks in wireless sensor networks [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(9):1752-1758. (in Chinese)
- [4] MARGI C B, PETKOV V, OBRACZKA K, *et al.*. Characterizing energy consumption in a visual sensor network testbed [C]. *Proceedings of the 2nd International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities*, 2006:332-339.
- [5] PRADHAN S S, KUSUMA J, RAMCHANDRAN K. Distributed compression in a dense microsensor network [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2002,3:51-60.
- [6] WAGNER R, NOWAK R, BARANIUK R. Distributed image compression for sensor networks using correspondence analysis and super-resolution

[C]. *Proceedings of the 2003 International Conference on Image Processing*, 2003:597-600.

- [7] WU H M, ABOUZEID A A. Power aware image transmission in energy constrained wireless networks [C]. *Proceedings of the 9th International Symposium on Computers and Communications*, 2004:202-207.
- [8] HEINZELMAN W B. Application-specific protocol architectures for wireless networks [D]. *Cambridge; Massachusetts Institute of Technology*, 2000.
- [9] WANG A, CHANDRAKASAN A. Energy efficient DSPs for wireless sensor networks [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2002,6:68-78.
- [10] ZUNIGA M, KRISHNAMACHARI B. Analyzing the transitional region in low power wireless links [C]. *Proceedings of the 2004 First Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, 2004:517-526.
- [11] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002,10:660-670.

作者简介:



鲁琴(1980—),女,湖北武汉人,博士研究生,2002年、2004年于国防科学技术大学分别获得学士和硕士学位,主要研究领域为无线传感器网络,图像压缩技术及其系统设计。E-mail: fre-da0126@gmail.com



胡冰(1986—),女,湖北随州人,硕士研究生,2008年于国防科学技术大学获得学士学位,主要研究领域为无线传感器网络及其应用。E-mail: Hu.Bing860618@gmail.com



罗武胜(1972—),男,湖南衡阳人,博士,副教授,主要研究领域为现代传感技术与系统。E-mail: lwsheng0701@sina.com