

# 无线传感器网络基于虚拟节点的小波压缩方法\*

杨圣洪<sup>1,2</sup>, 贾焰<sup>1</sup>, 周四望<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(国防科学技术大学 计算机学院, 湖南 长沙 410073)

<sup>2</sup>(湖南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410082)

通讯作者: 杨圣洪, E-mail: yangshenghong8@yahoo.com.cn

**摘要:** 除了能量受限以外,有限的存储容量也是无线传感器网络的基本特征.研究传感器网络中节省存储的数据传输问题,提出了一种基于虚拟节点的渐进数据传输方法.首先定义虚拟节点并建立各级虚拟节点之间的对应关系,充分利用传感数据的相关性;然后,设计基于此映射关系的传感数据调度算法,单轮传送数据的节点总数由相应簇头的实际存储容量决定,虚拟节点对每轮收集到的数据进行联合编码,形成节省存储的渐进数据传输.模拟实验表明,所提出的算法比 DIMENSIONS 有更小的网络耗能和延时,而且具有存储有效性.

**关键词:** 传感器网络;存储有效;数据传送;虚拟节点

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

中文引用格式: 杨圣洪,贾焰,周四望.无线传感器网络基于虚拟节点的小波压缩方法.软件学报,2013,24(3):557-563.  
<http://www.jos.org.cn/1000-9825/4235.htm>

英文引用格式: Yang SH, Jia Y, Zhou SW. Virtual nodes-based wavelet compression algorithm for wireless sensor networks. Ruanjian Xuebao/Journal of Software, 2013,24(3):557-563 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4235.htm>

## Virtual Nodes-Based Wavelet Compression Algorithm for Wireless Sensor Networks

YANG Sheng-Hong<sup>1,2</sup>, JIA Yan<sup>1</sup>, ZHOU Si-Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(College of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

<sup>2</sup>(College of Information Science and Engineering, Hu'nan University, Changsha 410082, China)

Corresponding author: YANG Sheng-Hong, E-mail: yangshenghong8@yahoo.com.cn

**Abstract:** In a wireless sensor network (WSN), the battery is not only limited to, but is also the storage memory. To reduce the requirement of a capacity of the memory in data transmissions, a virtual node based progressive data transmission protocol is proposed. First, the concept of a virtual node is introduced. Next the relationships among the virtual nodes are constructed aiming at making full use of sensory data dependence. Second, based on those relationships, a virtual nodes scheduling algorithm is proposed. In a certain data transmission round, the number of cluster members that are scheduled to transmit data is determined accordingly to the memory size of its corresponding cluster-head. The cluster-head collects the data and encodes them jointly, and the progressive memory efficient data transmission is formed. Theoretical analysis and experiment results show that this proposed method can further save energy consumption and has minimal delay compared to DIMENSIONS. More importantly, it is memory-efficient.

**Key words:** sensor network; memory efficient; data transmission; virtual node

无线传感器网络(wireless sensor networks)的研究已涉及到拓扑控制、时钟同步、路由协议和数据处理等领域,除能量受限外,存储有限问题也非常突出<sup>[1,2]</sup>.小波压缩是解决存储有限的有效方法,如文献[3,4]的分布式小波变换,文献[5]的滑动窗口小波变换,文献[6]的二维提升小波变换,文献[7]的去除传感数据间的时间和空间相关性后的小波变换.但由信息论原理可知,数据压缩率是有限的,海量数据压缩后的数据量依然十分巨大,因

\* 基金项目: 国家自然科学基金(60973127)

收稿时间: 2011-09-12; 修改时间: 2011-11-17; 定稿时间: 2012-03-23

此有人研究数据传送方法,将数据集传送到 Sink 或某个指定节点,从而释放节点的存储空间.文献[8]提出 DIMENSIONS 方法,利用小波的多分辨特性和传感数据间的相关性设计压缩算法,收集到数据压缩后传送到簇头节点,数据压缩的效率明显.DIMENSION 采用传统的小波压缩方法,即先读取所有数据后再变换,对簇头的存储空间要求却非常高.文献[9]基于环模型研究边变换边传送小波系数的方法,并将其扩展到了二维覆盖重叠模型.该方法依据小波函数的支撑长度和簇头实际存储容量来确定数据传送单元的大小,无需缓存簇内各节点的数据,有效降低了簇头节点的存储空间.为计算小波系数,处于环模型上的节点需要频繁交换数据,这就要求节点间的距离不宜过大,以节省通信耗能.显然,这种方法不适合空间分布遥远的簇头节点间的数据传送.

本文研究分簇传感器网络簇头节点间的渐进数据传送问题,基本思想是:为每个簇头构建一个对应的虚拟节点,虚拟节点的存储容量大小恰好能够容纳该簇头所辖传感器节点单轮传送的数据;通过最大化小波空间相关性建立上下层虚拟节点之间以及虚拟节点和传感器节点之间的映射关系;虚拟节点只对收到的编码数据做解码操作,不进行小波逆变换;虚拟节点以对应簇头的实际存储容量为单位并依据映射关系进行联合编码,从而形成节省存储的渐进数据压缩传送.

## 1 基于虚拟节点的渐进数据压缩传送算法

本节首先提出虚拟节点概念,然后基于虚拟节点提出簇头间的数据传送算法,目标是依据簇头的实际存储容量并利用传感数据间的小波空间相关性调度传送数据的簇头节点,使得渐进传送的数据单元能够产生大的编码增益,节省存储的同时降低耗能和延时.

### 1.1 虚拟节点

每个簇头对应着一个虚拟节点,恰好能够存储相应簇头所辖各传感器节点一轮传送过来的数据.其存储器称为虚拟存储器,被分为多个虚拟存储单元,一个单元存储着簇头节点所辖范围内的一个节点的数据.多个虚拟存储单元即多个下级节点可共用簇头的同一块存储空间,共用同块实际存储空间的所有虚拟存储单元,称为虚拟存储块.虚拟块的容量和等于相应簇头节点的实际可用存储容量.

### 1.2 簇头间基于虚拟节点的渐进数据压缩传送算法

算法先由底向上,基于地理位置依次建立传感器节点与第一级虚拟节点的对应关系,依据虚拟存储块的大小,并基于最大化小波空间相关性建立相邻两级虚拟节点之间的对应关系;然后自顶向下,由上一级簇头依据虚拟节点之间的对应关系选择下一级簇头节点或传感器节点,传送数据的节点总数由该簇头的实际存储容量确定,形成数据的渐进压缩传送.

算法分为 3 个阶段:

第 1 阶段是建立传感器节点与虚拟节点之间的对应关系:先为簇头构建一个虚拟节点,然后将此虚拟节点的存储器划分为若干存储单元.每个存储单元对应一个传感器节点,建立传感器节点与存储单元之间的一一对应关系,并使得存储单元对应的传感器节点块具有最大的小波空间相关性.组合邻近的存储单元,形成虚拟存储块,使得虚拟存储块的容量大小恰好等于相应簇头的实际可用存储容量.

第 2 阶段是建立虚拟节点与虚拟节点之间的对应关系.上一级虚拟节点的存储容量恰好等于下一级各虚拟节点的存储容量之和,两级虚拟节点之间形成一对多的关系.

第 3 阶段是簇头依据建立的虚拟节点对应关系收集数据,解码并联合编码,形成数据的渐进压缩传送.

分析上述 3 个阶段可以看出,算法无需缓存所有簇内节点传送的数据.

设传感器网络的第  $N$  级簇头节点需要收集传感数据.下面具体描述簇头间基于虚拟节点的渐进数据压缩传送算法(简称 CHDG).

为叙述清晰起见,采用如下记号:

- $H_{x,i}^l$ :表示第  $l$  级的第  $i$  个簇头节点,此簇头节点属于第  $l+1$  级的第  $x$  个簇头,该簇头共包含  $N_x^{l+1}$  个第  $l$

级的簇头节点,即  $1 \leq i \leq N_x^{l+1}$ .若  $l=N$ ,则  $x$  为空;

- $n_l$ :第  $l$  级簇头节点的总数,  $1 \leq l \leq N$ ;
- $m_{x,i}^l$ :  $H_{x,i}^l$  的实际存储容量;
- $V_{x,i}^l$ :与  $H_{x,i}^l$  对应的虚拟节点;
- $M_{x,i}^l$ :  $V_{x,i}^l$  的虚拟存储器;
- $B_{x,i,j}^l$ :  $V_{x,i}^l$  的第  $j$  个虚拟存储块;
- $S_{i,j}$ :传感器节点,此节点属于  $H_{x,i}^l, H_{x,i}^{l+1}$  共包含  $N_i^l$  个传感器节点,即  $1 \leq j \leq N_i^l$ ;
- $C_{i,j}$ :  $H_{x,i}^l$  中与  $S_{i,j}$  对应的虚拟存储单元;
- $D_{i,j}$ :  $S_{i,j}$  需要传送的数据量.

**CHDG 算法.**

(1) 第 1 级簇头构建与其对应的虚拟节点,划分虚拟存储块和虚拟存储单元,建立虚拟存储单元与传感器

节点之间的对应关系:  $C_{i,j} \leftrightarrow S_{i,j}, 1 \leq j \leq N_i^1$ ,使之满足  $M_{x,i}^1 = \sum_{j=1}^{N_i^1} D_{i,j}, 1 \leq x \leq n_2, 1 \leq i \leq n_1$ ;

(2) For  $l=2$  to  $N$

① 组合第  $l-1$  级簇头节点对应的虚拟存储器,形成第  $l$  级虚拟节点的虚拟存储器,建立对应关系:

$$V_{x,i}^l \rightarrow V_{i,1}^{l-1}, \dots, V_{i,N_i^{l-1}}^{l-1}, \text{使之满足 } M_{x,i}^l = \sum_{k=1}^{N_i^{l-1}} M_{i,k}^{l-1}, 1 \leq i \leq n_l, 1 \leq x \leq n_{l+1};$$

② 划分第  $l$  级虚拟节点的虚拟存储器:  $n_{x,i}^l = \left\lceil \frac{M_{x,i}^l}{m_{x,i}^l} \right\rceil (1 \leq i \leq n_l, 1 \leq x \leq n_{l+1})$ ,依据各虚拟存储块容量的

大小分别选择一组总容量与其相等的第  $l-1$  级虚拟存储块与其对应;

(3) For  $l=N$  down to 1

    If  $l=1$

        传感器节点向第 1 级簇头传送数据;

    Else

        第  $l$  级簇头依据虚拟节点之间的对应关系请求第  $l-1$  级簇头节点进行数据传送;

(4) 传感器节点向第 1 级簇头传送小波压缩后的数据;

(5) For  $l=1$  to  $N-1$

    第  $l$  级簇头节点依据虚拟节点间的对应关系向第  $l+1$  级簇头传送数据,该簇头解码并联合编码;

**1.3 实例**

设一个传感器网络由 256 节点和 17 个簇头组成,每个簇包含 1 个簇头和 16 个簇内节点,16 个簇头节点组成第 2 级分簇.节点的可用内存容量为 10K 字节,第 1 级、第 2 级簇头的实际可用内存分别为 40K 和 640K 字节,节点每轮传送 10K 字节的数据.不难看出,簇头内存容量有限,无法存储簇内节点一轮传送的数据.

分别为两级簇头构建虚拟节点,内存容量关系见表 1.

**Table 1** Memory size of virtual node (byte)

**表 1** 虚拟节点内存容量(字节)关系

	虚拟存储器	虚拟存储块	虚拟存储单元
一级虚拟节点	160K	40K	10K
二级虚拟节点	2.5M	640K	10K

依据 CHDG 算法,渐进调度如图 1 所示(未显示簇头),黑色实心点表示节点.4 个空间邻近簇构成二级虚拟节点的虚拟存储块,共 4 个虚拟存储块;在每个簇中,4 个空间邻近的节点构成一级虚拟节点的虚拟存储块,虚拟

存储块的内存容量等于簇头的实际存储容量,从而保证渐进传送时的数据相关性.

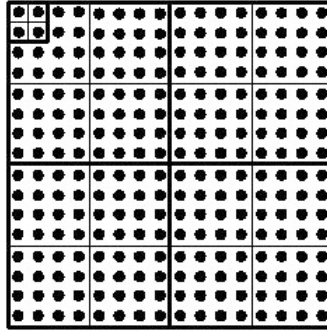


Fig.1 Data scheduling of CHDG

图 1 CHDG 数据调度

#### 1.4 算法分析与讨论

CHDG 算法依据虚拟存储块的大小以及虚拟节点间的对应关系确定渐进传送的数据单元,对簇头存储容量的需求与传感数据总量无关,从而具有存储有效性.

CHDG 算法计算复杂度低.如上所述,设  $n_l$  是第  $l$  级簇头节点数,传感器节点总数为  $n$ .显然,  $\sum_{l=1}^N n_l \leq n$ . 算法第(1)步的复杂度为  $O(n)$ ;第(2)步~第(5)步形成的复杂度为  $\sum_{l=1}^N O(n_l)$ ;第(3)步以及第(5)步形成的复杂度均为  $\sum_{l=1}^N O(n_l) + O(n)$ . 因为  $\sum_{l=1}^N n_l < n$ , 所以总的计算复杂度为  $O(n)$ .

CHDG 算法能量消耗少.在分簇传感器网络部署阶段,都有一个成簇阶段;在簇运行过程中,有簇更新阶段<sup>[10]</sup>.对于 CHDG 算法,虚拟节点的建立阶段伴随簇形成而完成,随着簇结构的更新而更新和维护,因而不增加额外的耗能;在数据收集阶段,对基于事件驱动传感器网络,在检测到事件发生后即向 Sink 节点传送数据,不需要执行算法的第(3)步,进一步节省了传输耗能.

本质上,虚拟节点是一种逻辑上的传感器节点.利用虚拟节点,仿佛在实际传感器网络之上建立一个虚拟的逻辑网络.CHDG 算法的步骤(1)和步骤(2)保证了虚拟逻辑网络和实际传感器网络节点之间的一一映射关系.虚拟节点是为建立逻辑网络而设计的,是虚拟存在的,其存储空间依据待传输数据量设定,因而不存在存储容量限制.这样,算法就不再需要考虑实际传感器节点存储空间的限制,可以专注于数据的渐近传输.

## 2 仿真实验与分析

用于实验的无线传感器网络分为 8 个簇,8 个簇头节点组成高级簇,由一个高级簇头控制,形成二级分簇的体系结构.模拟实验基于网络仿真平台 OMNet++4.0,MAC 层协议采用 802.11.节点数据取自热带大气海洋项目(TAO, <http://www.pmel.noaa.gov/tao/>),从存储、耗能和延时的角度来比较本文提出的 CHDG 算法和经典的 DIMENSIONS 算法.在本实验中,耗能的计算将综合考虑发送耗能和接收耗能,其计算将采用文献[10]所述一阶无线模型(first order radio model)进行耗能分析.

正如前文所述,作为一类无线传感器网络小波数据压缩算法,DIMENSIONS 重点关注数据压缩性能与节能效率,但它没有考虑簇头的存储容量限制.

在小波数据压缩中,无论对本文提出的算法 CHDG 还是 DIMENSIONS,均采用基于 Huffman 和游程编码的小波系数混合熵编码技术,以便公平合理地延时、耗能和存储.实验结果如图 2~图 7 所示.

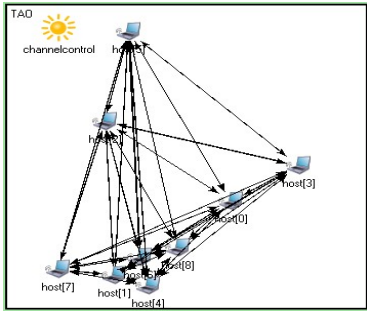


Fig.2 Network topology  
图2 网络拓扑

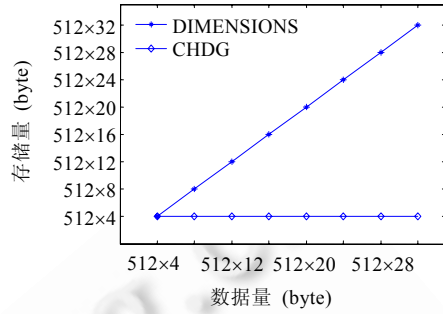


Fig.3 Memory size in high-tier cluster header  
图3 高级簇头存储量需求变化

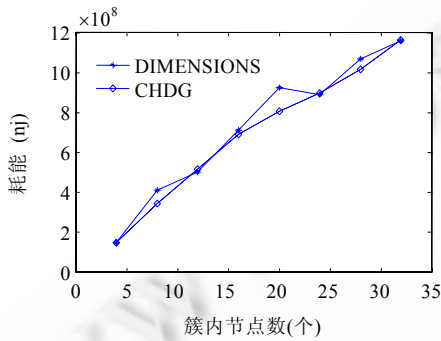


Fig.4 Energy consumption with different cluster sizes  
图4 簇规模变化时耗能

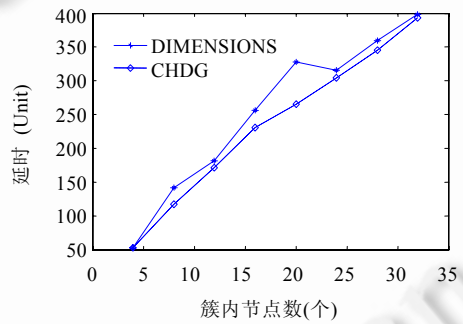


Fig.5 Delay with different cluster sizes  
图5 簇规模变化时的延时

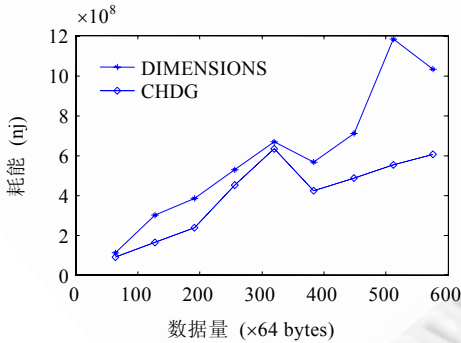


Fig.6 Energy consumption with different data sizes  
图6 节点数据量变化时耗能

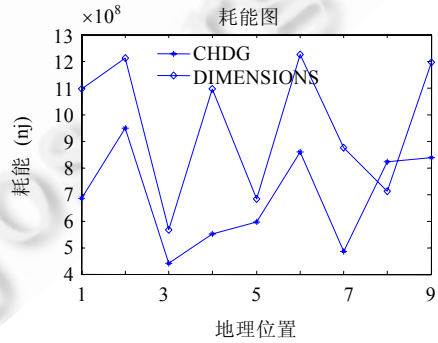


Fig.7 Energy consumption with different deployments  
图7 不同地理位置数据耗能情况

图2是OMNet++仿真环境下生成的网络拓扑图.简单起见,图2仅显示了由8个簇头节点形成的高级簇,图中的双箭头表示此节点对处在彼此的通信范围之内.MAC层遵循802.11协议,网络层遵循分簇路由协议.从图3可以看出,随着簇规模增大(从4节点/簇~32节点/簇),簇头需接收的数据量增多.在DIMENSIONS框架下,高级簇头所需存储容量随着簇规模的增大而线性增加,而CHDG算法则具有存储有效性,这是因为CHDG能够基于簇头的存储容量动态地调度传感器节点传送数据的缘故.从图4可以看出,随着簇规模的增大,各种算法因发送、接收数据和相应控制开销所引起耗能均相应增加,但与DIMENSIONS相比,我们提出的算法耗能更小.图5

是与图 4 对应的由于数据传输而造成的网络延时图。从图 5 可以看出,随着簇规模的增大,网络中参与传输的数据量增大,网络延时也相应增加,而我们提出的算法延时更小。延时计算是从发送第 1 个数据包开始到发送完最后一个数据包为止的 OMNet 仿真时间。本实验采用的是温度数据,每个数据传送单元承载的数据量最大在 103 字节的数量级,因此没有考虑虚拟节点编码和解码带来的计算延迟。图 5 的折线趋势和图 4 类似,这是因为在分簇无线传感器网络环境下,产生耗能和延时的主要原因均来自数据通信的缘故。图 6 表示簇规模不变而单个节点发送数据量变化时的网络耗能情况。随着节点发送数据的增多,网络耗能呈增长趋势,而我们提出的算法具有更小的耗能。小波数据压缩是一种自适应的压缩算法,压缩比和具体的传感数据集有关,因此在图 6 所示能耗曲线中,数据量在 400 的位置比 300 的位置产生了稍小的网络传输耗能。图 7 表示簇规模和节点发送的数据量均不变,而实验采集数据的传感器位置发生变化时的耗能情况。数据取自 TAO 数据集,是赤道平面上从东经 137°~西经 125°在深度 100m 处的 9 个位置点。从图 7 可以看出,其数据折线的趋势和图 3~图 6 不同,在一定程度上具有随机性。这是因为小波压缩的效率除了算法本身以外,还依赖于具体数据集的缘故。虽然图 7 中的数据点随机波动,但小波压缩算法就波动幅度限制在一个小范围之内。图 7 也表明,不管数据如何变化,我们提出的算法始终具有小的耗能。因为延时折线与耗能折线有着相同的趋势,所以在本节没有列出与图 6 和图 7 对应的延时折线。

### 3 结 论

在分簇无线传感器网络中,靠近 Sink 的高级簇头常常掌控更大的监测区域,因而汇聚了更多的传感信息。若采用传统的数据压缩等数据处理方法,则会带来信息爆炸问题。针对此问题,本文提出一种节省存储的渐进小波数据压缩算法 CHDG。该算法通过构建虚拟节点最大化所辖传感器节点块的小波空间相关性,依据簇头节点的实际存储容量来调度渐进传送数据的传感器节点,因而具有存储有效性。小波空间相关性最大化的特点也使得小波数据压缩算法能够产生高的压缩效率,因此,我们提出的算法不但比 DIMENSIONS 有更小的网络耗能和延时,还具有存储有效性。

### References:

- [1] Culler D, Estrin D, Srivastava M. Overview of sensor networks. *Computer*, 2004,37(8):41-49. [doi: 10.1109/MC.2004.93]
- [2] Li JZ, Gao H. Survey on sensor network research. *Journal of Computer Research and Development*, 2008,45(1):1-15 (in Chinese with English abstract).
- [3] Kimura N, Latifi S. A survey on data compression in wireless sensor networks. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Information Technology: Coding and Computing (ITCC 2005)*, Vol.2. 2005. 8-13. [doi: 10.1109/ITCC.2005.43]
- [4] Narang SK, Shen G, Ortega A. Unidirectional graph-based wavelet transforms for efficient data gathering in sensor networks. In: *Proc. of the IEEE ICASSP*. 2010. [doi: 10.1109/ICASSP.2010.5496172]
- [5] Ciancio A, Ortega A. A distributed wavelet compression algorithm for wireless multihop sensor networks using lifting. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*. 2005. 825-828. [doi: 10.1109/ICASSP.2005.1416136]
- [6] Liu K, Teng W, Chen M. Dynamic wavelet synopses management over sliding widows in sensor networks. *IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering*, 2010,22(2):193-206. [doi: 10.1109/TKDE.2009.51]
- [7] Zhou SW, Lin YP, Zhang JM, Ouyang JC, Lu XG. A wavelet data compression algorithm using ring topology for wireless sensor networks. *Ruanjian Xuebao/Journal of Software*, 2007,18(3):669-680 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/669.htm> [doi: 10.1360/jos180669]
- [8] Ganesan D, Estrin D, Heidemann J. DIMENSIONS: Why do we need a new data handling architecture for sensor networks? *SIGCOMM Computer Communication Review*, 2003,33(1):143-148. [doi: 10.1145/774763.774786]
- [9] Zhou SW, Lin YP, Ye ST, Hu YP. A wavelet data compression algorithm with memory-efficiency for wireless sensor network. *Journal of Computer Research and Development*, 2009,46(12):2085-2092 (in Chinese with English abstract).
- [10] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-Efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In: *Proc. of the 33rd Annual Hawaii Int'l Conf. on System Sciences (HICSS)*. 2000. 3005-3014. [doi: 10.1109/HICSS.2000.926982]

附中文参考文献:

- [2] 李建中,高宏.无线传感器网络的研究进展.计算机研究与发展,2008,45(1):1-15.
- [7] 周四望,林亚平,张建明,欧阳竞成,卢新国.传感器网络中基于环模型的小波数据压缩算法.软件学报,2007,18(3):669-680.  
<http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/669.htm> [doi: 10.1360/jos180669]
- [9] 周四望,林亚平,叶松涛,胡玉鹏.传感器网络中一种存储有效的小波渐进数据压缩算法.计算机研究与发展,2009,46(12):2085-2092.



杨圣洪(1965—),男,湖南涟源人,博士生,副教授,主要研究领域为分布计算,数据库.

E-mail: yangshenghong8@yahoo.com.cn



周四望(1971—),男,博士,副教授,博士生导师,CCF会员,主要研究领域为无线传感器网络,小波分析.

E-mail: swzhou@hnu.edu.cn



贾焰(1960—),女,博士,教授,博士生导师,CCF会员,主要研究领域为信息安全,数据库.

E-mail: jiayanjy@vip.sina.com