

流量自适应的无线传感器网络簇内通信算法^{*}

彭娜, 刘慧中

(湖南大学 计算机与通信学院, 长沙 410082)

摘要: 提出了一种流量自适应的无线传感器网络簇内通信算法。该算法根据各传感器节点所需传送的数据量来给各节点分配长度不等的时隙,使其能在所分配的时隙内有效地传送完所有的数据,减少节点空闲时和节点从睡眠到活跃状态来回切换时所消耗的能量。不同长度的时隙构成了不同长度的帧,整个簇生存期由不同长度的帧构成。仿真实验证明该算法相对于传统 TDMA 算法和 BMA 算法既节省了能量,又提高了信道利用率。

关键词: 无线传感器网络; 簇内通信; 流量自适应

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2010)09-3449-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.09.066

Traffic adaptive communication algorithm within clusters for WSN

PENG Na, LIU Hui-zhong

(School of Computer & Communication, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: This paper proposed a traffic adaptive communication algorithm in wireless sensor network. The slot of varying length would be allocated to each node according to the amount of data to be transmitted. Node could send full data effectively within the assigned time slot, which would reduce its idle time and saved energy that the node switching back and forth from sleep to active state. Different length of frames consists of different lengths of time slots, while the lifetime of the whole cluster consists of the different length of frames. Compared with traditional TDMA algorithm and BMA algorithm, the simulation results shows that the algorithm not only saves energy consumption but also enhances the channel utilization.

Key words: wireless sensor networks(WSN); communications within the clusters; traffic adaptive

由于事件驱动的传感器网络的数据流是不断变化的,很多情况下节点都处于空闲等待状态,因此传统的簇内通信算法中固定时隙长度将不能最大可能的节省能量。无线传感器网络一般被分成多个簇,当簇建立好后,下一阶段就是簇的数据传输。按照成员节点到簇头的跳数,簇的结构可以分为单跳网络和多跳网络。单跳网络如 LEACH^[1]等算法形成的簇;多跳网络如 LSCP 等算法形成的簇。此外,还存在其他结构的簇,如 PEGASIS^[2]形成的簇是一条链。簇的路由依赖于簇的结构,成簇算法生成的簇的结构在一定程度上决定了簇的数据传输模式。

在传感器节点中,无线通信模块被认为是传感器节点中能量消耗的主要所在^[3]。而采用 TDMA 方式可以调度节点在不同时隙内收发数据,避免了与邻居节点发生冲突;同时,节点仅在其分配的时隙内打开无线收发器,进行可能的通信,大大减少了空闲侦听的时间。因此,TDMA 协议具有内在的节能特性,一些传统的分簇算法也都采用 TDMA 方式进行簇内通信,每个节点都相应地分配到自己的通信时隙。但是对于事件驱动的传感器网络来说,其数据的采集和发送都具有突发性,是不可预测的。传感器节点只在某些特定事件发生时才需要传输数据,很多情况可能处于空闲等待的状态,所以传统的簇数据传输算法不太适合于事件驱动的传感器网络应用,存在带宽利用率低、能量消耗大等缺点^[4]。

经典的 LEACH 算法和 HEED^[5]算法均以簇的方式来组织自己,并采用 TDMA 方式进行簇内通信。BMA 协议^[6]改进了

传统的 TDMA 协议,即在每帧开始时有一个竞争阶段(CP),当传感器节点有需要传输数据的节点向簇头发送 1 bit 的控制消息预定时隙,这样簇头节点知道在当前帧内有哪些节点需要传输数据,并给这些节点分配时隙。

若传感器节点以相同速率采集和发送数据,且始终有数据传输,此类数据传输模式是非常有效的。但是对于事件驱动的传感器网络应用,则存在以下缺点:a)能量浪费大;b)带宽利用率低。本文针对事件驱动的传感器网络数据流量突发性的特点,设计一种基于流量的事件驱动的传感器网络簇内通信算法。通过节点的数据传输量(即数据流大小)来构建长度不等的时隙,从而形成长度不等的帧长来提高网络的信道利用率和能量利用率,延长网络的生存期。

1 自适应通信算法设计

在事件驱动的传感器网络中,簇内的成员节点处于不同的位置,而不同位置处事件产生的概率不一样,相同簇内的成员节点在相同时间内监测到的数据量不同。因此,固定的时隙分配方式将不适应于事件驱动型的传感器网络。为了节省能量,让成员节点监测到的数据能够在分配到的时隙内有效地传送给簇头,可以用簇内节点采集到的数据传输量来决定该节点的时隙长度。

网络的簇生存期,即数据传输所处阶段,由 n 个长度不等

收稿日期: 2010-01-25; 修回日期: 2010-03-02 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60903019); 湖南省科技计划重点资助项目(2009GK2008)

作者简介: 彭娜(1980-),女,湖南株洲人,硕士研究生,主要研究方向为无线通信网络、无线传感器网络(nap@hnu.cn); 刘慧中(1984-),女,湖南娄底人,硕士研究生,主要研究方向为无线传感器网络。

的帧组成,每帧对应一次簇内的数据收集,由长度不等的时隙组成,分为以下三个阶段(图 1):

a) 预定阶段。由 n 个 mini slot 组成, n 为簇内成员节点的个数,成员节点根据其 ID(网络中节点 ID 唯一)大小顺序占有此 n 个 mini slot。若某成员节点 S_i 监测到某特定事件发生(称此类节点为源节点),即有数据需要传送,则将自己的节点 ID 和所需传输的数据包数 W_{ki} 报告给簇头以预定阶段,发送消息 MSG_RSV(ID, W_{ki}),类似 BMA 协议,该消息可以仅为 1 bit;否则,不发送任何数据。则预定阶段的长度为发送 n bit 所需的时间。

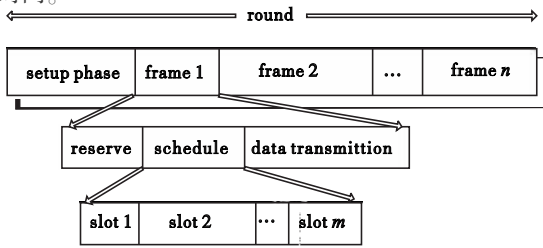


图 1 流量自适应改变时隙长度的不同帧长的帧结构

b) 调度阶段。簇头节点根据预定阶段中成功收到的预定消息,仅给各监测到事件的成员节点(源节点)分配时隙。没监测到事件的成员节点,即那些没有给簇头发送预定消息的节点,不给分配时隙,表明其无数据需要传送。假设节点 i 在第 k 帧中要发送的数据包数为 W_{ki} ,发送一个数据包的时间为 T_u ,则源节点 S_i 所分配到的时隙为 T_u 的 W_{ki} 倍。为了避免带宽被某个节点独占,设置一个最大时隙长度 MAX_SLOT,若 $W_{ki}T_u$ 值超过 MAX_SLOT,则 S_i 时隙长度为 MAX_SLOT,如式(1)所示。这样即节省了带宽,又节约了簇头因监听那些没有数据需要传送的节点所耗费的能量,使得源节点监测到的数据能有效地传送给簇头。

$$\text{slot}(i) = \begin{cases} W_{ki}T_u & (W_{ki}T_u < \text{MAX_SLOT}) \\ \text{MAX_SLOT} & (W_{ki}T_u \geq \text{MAX_SLOT}) \end{cases} \quad (1)$$

当簇头为所有源成员节点分配好时隙后,广播一个时隙调度包。包的结构如图 2 所示。假设源节点个数为 m 。其中 $0 \leq m \leq n$, n 为簇内节点数。

| | | |
|-------------------|--------------------|-----------------------------|
| cluster header ID | message | |
| | T_{start} | list _{member} |
| | SID(1,2,...,m) | slot(1),slot(2),...,slot(m) |

图 2 时隙调度包格式

其中:cluster header ID 是簇头节点 ID;message 消息部分包括;该帧时隙开始时间 T_{start} ,源节点有序序列 list_{member},与源节点序列对应的源节点时隙有序序列 list_{slot}。簇头根据在预定阶段收到的源节点发送的预定消息 MSG_RSV(ID, W_{ki}) 的先后确定源节点序列,同时取得预定消息中的各源节点需要发送的数据包数 W_{ki} ,来确定各源节点的时隙长度,从而确定源节点时隙有序序列。根据该帧时隙开始时间 T_{start} ,各源节点就可以依据式(2)来计算自己的时隙开始时间 T_i :

$$T_i = \sum_{i=1}^m \text{slot}(i) + T_{\text{start}} \quad (2)$$

另外,若 $M=0$ 时,设置该帧长度为缺省帧长,表明本帧内没有节点监测到数据,即特定事件没有发生,此时所有成员节点将睡眠一个缺省帧长,整个簇处于一个低能耗状态。

c) 数据传输阶段。各源节点在其获得的时隙内进行数据传输,提高了信道带宽的利用率,减少了簇头的空闲侦听,节省

了能量消耗。另外,由于簇头也可以利用同样的方法来计算出簇内成员时隙开始的时间,可以取得接收方和发送方时隙的统一,即所需传输的数据量大的节点分到的时隙长度长,所需传输的数据量小的节点分到的时隙短。

2 节点能量分析

考虑一个簇生存期内整个簇处理 W bit 所消耗的能量。假设簇生存期为 T ,簇内节点数为 N ,活动节点数为 m ,整个簇生存期由 K 帧组成,数据包传输速率为 v bps,节点的发送功率为 P_s ,接收功率为 P_r ,节点在空闲状态消耗的功率为 P_i ,簇头侦听一个节点等候其发送数据所消耗的功率为 P_d ,发送或接收一个时隙调度包所消耗能量为 E_{slot} 。

在本文流量自适应算法中,每一帧的长度等于各活动节点在该帧内分配到的时隙长度 slot(i)之和以及预留阶段和数据传输阶段的长度 L ,即

$$\text{frame}(j) = L + \sum_{i=1}^m \text{slot}(i) = L + \sum_{i=1}^m (W_{ki}T_u) \quad (3)$$

因此,整个传输数据的时间为 W/v ,等于簇生存期内所有分配时隙的总和。得出

$$\frac{W}{v} = \sum_{j=1}^k \text{frame}(j) = \sum_{j=1}^k (L + \sum_{i=1}^m W_{ki}T_u) \quad (4)$$

在整个簇生存期内,簇内节点所消耗的能量即为活动节点所消耗的能量,因为没有数据需要传送的节点进入睡眠状态,忽略其能量消耗。活动节点所消耗的能量包括发送数据包所消耗的能量和接收簇头节点发送来的时隙调度包所消耗的能量为

$$E_{\text{active}} = \sum_{j=1}^k (\sum_{i=1}^m P_s W_{ki}T_u + E_{\text{slot}}) \quad (5)$$

簇头节点在该簇生存期内消耗的能量包括三个部分:每一帧广播一个时隙调度包所消耗的能量,接收活动节点发送数据包所消耗的能量和侦听活动节点所消耗的能量。公式为

$$E_{\text{ch}} = kE_{\text{slot}} + \sum_{j=1}^k (\sum_{i=1}^m (P_r W_{ki}T_u)) + \frac{W}{v} P_d \quad (6)$$

因此,整个簇消耗的能量为

$$E_T = E_{\text{active}} + E_{\text{ch}} = \sum_{j=1}^k (\sum_{i=1}^m (P_s W_{ki}T_u + E_{\text{slot}})) + kE_{\text{slot}} + \sum_{j=1}^k (\sum_{i=1}^m (P_r W_{ki}T_u)) + \frac{W}{v} P_d \quad (7)$$

其中: $k = k'$ (k' 由式(4)得出)取上整。

对于传统的 TDMA 方式,所有帧长度相等,节点的时隙长度固定不变,设置为 T_{slot} 。若节点数据传输量较小时,即 $W_{ki} \times T_u < T_{\text{slot}}$,在簇生存期内整个簇消耗的能量分析如下:

每个帧长度为

$$\text{frame}(j) = NT_{\text{slot}} \quad (8)$$

因此,得出整个簇生存期 T 内的帧数为

$$k = T/NT_{\text{slot}} \quad (9)$$

对于节点采集数据量较大时,即 $W_{ki} \times T_u > T_{\text{slot}}$,节点需要传送的数据在当前时隙内不能完全传送完,部分数据包得等到该节点的下次时隙时传送。因此,增加了节点在活动状态与睡眠状态之间转换所消耗的能量,在整个簇生存期内为

$$E_{\text{trans}} = \frac{2W}{vW_{ki}T_u} E_{\text{change}} \quad (10)$$

其中: E_{change} 为节点从活跃到休眠或从休眠到活跃状态所消耗的能量。

对于 BMA 算法,与传统 TDMA 算法一样的是也是设置帧

长度相等,固定各节点的时隙,但每一帧多了一个 CP 阶段。因此,簇内节点所耗能量与传统 TDMA 中类似,当节点采集数据量较大时,也存在节点从活跃到休眠或从休眠到活跃状态能量的消耗,另外多了接收 TDMA 调度消息的能量开销。BMA 算法改进的是簇头只侦听源节点的信息,当帧内所有源节点传输完数据后,簇头进入睡眠状态,直到下一帧开始时苏醒。因此节省了簇头无谓侦听的能量,但每一帧开始簇头得广播一次 TDMA 调度消息。

如果固定节点的时隙长度,当节点采集的数据量 W_{hi} 比较小时,则节点处于空闲状态的时间就相对比较长,此时,簇头也处于空闲帧听状态,造成了浪费;而当节点采集的数据量 W_{hi} 比较大时,节点在当前的时隙内不能发送完所有的数据包,有些数据包需要在节点缓冲区排队等待下次节点时隙的来临,这样就增加了数据包传输的延时。另外,也增加了节点来回切换的次数,由文献[7]可以看出,节点从活跃到休眠或从休眠到活跃状态切换的能量消耗比较大,这样由 E_{change} 所消耗的节点能量将会增加。本文流量自适应数据通信算法中,由于采用不等长的帧结构和事件驱动调度机制,较好地提高了信道利用率,减少了不必要的能量消耗。

3 实验结果与数据分析

为了验证算法的有效性,利用 OMNET++ 网络仿真工具对算法进行仿真。实验参数如表 1 所示,节点发送接收等功率和能耗的选择参考目前已有的传感器节点^[8](Mica, Wins);利用数据包的平均速率来决定 T_{slot} ;根据文献[6]中研究的活动节点数量与网络覆盖率之间的关系,本文考虑网络覆盖率为 99% 时所需的活动节点数;假设网络负载的产生遵从伯努利过程,即节点有数据需要传输的几率为 p ,通过设置 p 值的大小控制网络的负载。

表 1 实验参数

| 参数 | 取值 | 参数 | 取值 |
|----------------|-----------|-------------------------|----------------------|
| 传感器网络区域/ m^2 | 200 × 200 | 空闲功率 P_s/mW | 410 |
| 传感器节点数目/个 | 800 | 状态切换能量消耗 E_{change}/J | 1.9×10^{-4} |
| 节点密度个/ m^2 | 0.02 | T_{slot}/s | 0.045 |
| 传感半径/m | 12 | $W_{hi}T_u$ | (0.01 ~ 0.08) 随机数 |
| 簇半径/m | 30 | 簇内活动节点数比例 m/N | 45% |
| 发送功率 P_s/mW | 660 | 簇生存期 T/s | 60 |
| 接收功率 P_r/mW | 512 | | |

假设该网络为已分簇状态,将验证某一个单独的簇在处理 W bit 数据时分别利用流量自适应算法、传统 TDMA 算法和 BMA 算法所消耗的能量;在簇生存期内该三种算法所传输的数据包数;单位时间内簇数据收集次数。

图 3 为不同网络负载情况下,簇在簇生存期内处理 W bit 数据量所消耗的能量。图 3 说明了随着网络负载的增大,各协议的能量消耗也都随之增大。在低负载时,TDMA 协议消耗的能量最大,而 BMA 协议改进了簇头侦听方式,只对活动节点进行侦听,因此节省了能量。但是当网络负载较大时,活动节点数增加,TDMA 协议反而比本文算法所消耗的能量要小,因为本文算法还需要消耗额外的时隙调度的开销。

图 4 为不同节点密度的情况下,整个簇生存期内所消耗的能量。由图 4 可知,随着节点密度的增大,各协议的能量消耗

也随之增加。对于 TDMA 协议,簇内的所有节点在整个簇生存期内都处于工作状态,因此节点数越多,能量浪费越大,特别是低负载网络。另外,BMA 协议的能量消耗增长速度要比本文流量自适应算法要快。由于本文算法是基于事件驱动的,只有当特定事件产生时才进行数据的传输,且节点时隙随着数据量的大小自适应调整,减少了节点从活动状态到睡眠状态来回切换的能量。因此,本文流量自适应算法非常适合于节点密度高、网络负载小的无线传感器网络。

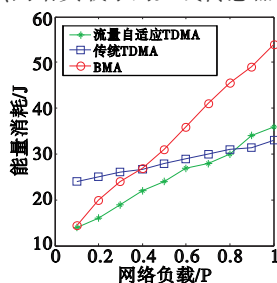


图3 不同负载下簇消耗的能量

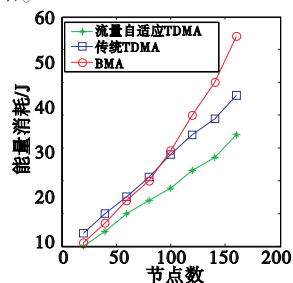


图4 不同节点密度下簇消耗的能量

图 5、6 分别为不同网络负载下整个簇生存期内簇进行平均数据收集次数和簇处理的总数据量,由图可知,网络负载较低时,本文流量自适应协议的数据收集次数要远大于传统的 TDMA 协议和 BMA 协议。流量自适应算法只给活动节点分配了时隙,且时隙与数据量有关。因此,网络负载低时,活动节点数少,其帧长也短。故一个簇生存期内能包含更多的帧,能进行更多轮次的数据收集,因此在负载相同的情况下能够发送更多的数据包。而传统 TDMA 协议和 BMA 协议都固定帧长,设定的帧长与簇内节点数目相关,为簇内所有节点(包括活动节点和非活动节点)都分配时隙,因此其帧长要大于本文算法的帧长。故相同簇生存期内包含的帧数要少些,进行的数据收集的次数就少些,相应地发送的数据包的数目也要小很多。随着负载的增大,活动节点的数目增多,时隙也变长,本文算法的帧长也变长,其数据收集次数逐渐减小并趋近于 BMA 协议。

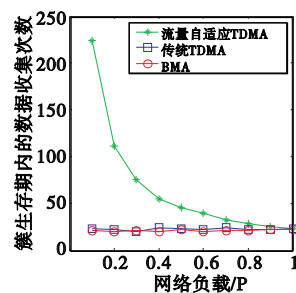


图5 簇生存期内的数据收集次数

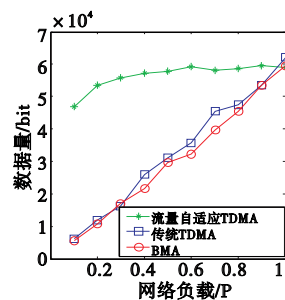


图6 簇生存期内发送的数据量

4 结束语

由于事件驱动的传感器网络的数据流是不断变化的,很多情况下节点都处于空闲等待状态,传统的簇内通信算法中固定时隙长度将不能最大可能的节省能量。针对该问题,本文提出了一种基于自适应流量的 TDMA 簇内通信算法,该算法根据当前节点数据流量的变化,自适应地调整该节点在其簇中的时隙长度,减少节点空闲时消耗的能量和节点从睡眠到活跃状态来回切换的能量,以及簇头无谓侦听的能量。下一步工作将设计兼有平面和分簇结构的异构网络数据传输模式,既有效地管理好网络拓扑,又能有效地利用能量,以及 (下转第 3455 页)

$d=4$,每个传感器上的读数数量的平均值 $\bar{X}=1\ 730$ 。实验中假设 0 号传感器是 sink 节点所在的位置。实验用 Visual C++ 6.0 实现上述算法,运行机器配置为 P4 1.66 GHz CPU、512 MB 内存,操作系统为 Windows XP。

实验将本文所提的 OTOD 算法与文献[7]中 EA 算法进行比较,主要测试算法对用户的依赖性、通信量、检测精度和计算量等内容,并将分布 OTOD 算法与集中算法(COTOD)、EA 分布算法(EA)和 EA 集中算法(CEA)的性能进行比较。

OTOD 算法只要用户指定一个参数,即用户期望的离群点个数 n 即可,EA 算法需要用户指定三个阈值,阈值难以确定,并且通过阈值只能判断读数离群与不离群,而参数 n 比较容易指定,且具有离群度。因此,从用户依赖性角度看,OTOD 算法优于 EA 算法。

实验中,通信耗能和访问耗能等有关参数参照文献[10]设置。实验结果用相对比表示,即取四种算法中最大值为 100%,其余是相对最大值的百分比。图 3 是 OTOD、COTOD、EA、CEA 算法在检测精度、通信复杂度、存储复杂度和计算复杂度上的实验结果比较图。从图 3 可以看出,在检测精度方面,OTOD 和 COTOD 具有相同检测精度,并高于 EA 和 CEA。分析原因主要是 OTOD 算法充分考虑了时空数据的特点,而 EA 算法因使用统一分布参数影响了检测精度。在通信复杂度上,从图 3 可以看出,分布算法明显低于集中算法,而集中算法涉及大量数据的多跳传输,因此通信耗能大,而且 EA 算法的多跳传输信息量又高于 OTOD 算法,所以 EA 耗能高于 OTOD。在存储复杂度上,集中算法也明显高于分布算法,分布 EA 算法要保存所有读数,OTOD 仅保存窗口信息,所以 OTOD 存储复杂度低于 EA。在计算复杂度上,集中算法因涉及所有数据的计算,所以复杂度明显高于分布算法;EA 算法因涉及协方差矩阵计算,所以复杂度又高于 OTOD 算法。

从上面分析比较可以看出,在用户依赖性、检测精度、通信复杂度、存储复杂度和计算复杂度等方面 OTOD 算法优于 EA 算法。



图2 IBRL实验室部署的传感器节点位置

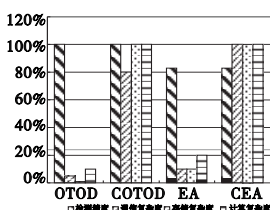


图3 OTOD与EA算法在分布与集中情况下的实验结果比较

4 结束语

本文针对现有的无线传感器异常检测算法存在检测精度低、用户依赖性大、通信量大和计算复杂度高局限,提出了三阶段的在线离群点检测算法 OTOD,利用时空关联性有效提高了检测精度;利用分布计算减少了通信量,降低了计算复杂度。理论分析和实验结果均表明 OTOD 算法优于现有算法。未来将研究与实际应用的结合。

参考文献:

- [1] CHANDOLA V, BANERJEE A, KUMAR V. Anomaly detection: a survey[J]. *ACM Computing Surveys*,2009,41(3):1-58.
- [2] SHENG Bo, LI Qun, MAO Wei-zhen, et al. Outlier detection in sensor networks[C]//Proc of the 8th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing. New York: ACM Press, 2007.
- [3] SUBRAMANIAM S, PALPANAS T, PAPADOPOULOS D, et al. Online outlier detection in sensor data using non-parametric model [C]//Proc of the 32th International Conference on Very Large Data Bases. 2006:187-198.
- [4] WU Wei, CHENG Xiu-zhen, DING Min, et al. Localized outlying and boundary data detection in sensor networks[J]. *IEEE Trans on Knowledge and Data Engineering*, 2007,19(8):1145-1157.
- [5] ZHANG Ke-jia, SHI Sheng-fei, GAO Hong, et al. Unsupervised outlier detection in sensor networks using aggregation tree [C]//Proc of the 3rd International conference on ADMA. Berlin: Springer-Verlag, 2007:158-169.
- [6] BRANCH J, SZYMANSKI B, GIANNELLA C, et al. In-network outlier detection in wireless sensor networks [C]//Proc of the 26th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems. Washington DC: IEEE Computer Society, 2006:51-58.
- [7] RAJASEGARAR S, BEZDEK J C, LECKIE C, et al. Elliptical anomalies in wireless sensor networks [J]. *ACM Trans on Sensor Networks*,2009,6(1):1-28.
- [8] 薛安荣,鞠时光,何伟华,等. 局部离群点挖掘算法研究[J]. *计算机学报*,2007,30(8):1455-1463.
- [9] IBRL. Intel Lab data [EB/OL]. (2004-04-28) [2010-02]. <http://db.lcs.mit.edu/labdata/labdata.html>.
- [10] CHOHAN N. Hardware assisted compression in wireless sensor networks [EB/OL]. (2007-05-27) [2010-02]. <http://www.cs.ucsb.edu/~nchohan/docs/adcswnProgressReport.pdf>.

(上接第 3451 页)如何融合和处理簇内和簇间数据的方法。

参考文献:

- [1] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks [C]//Proc of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences. Washington DC: IEEE Computer Society, 2000:3005-3014.
- [2] LINDSEY S, RAGHAVENDRA C S. PEGASIS: power-efficient gathering in sensor information systems [C]//Proc of IEEE Aerospace Conference. Montana: IEEE Computer Society, 2002:1125-1130.
- [3] RENTALA P, MUSUNURI R, GANDHAM S, et al. Survey on sensor networks [R]. Technical Report, UTDCS-33-02, Dallas, TX, USA: University of Texas at Dallas, 2002.

- [4] 汪泉弟,孔卫,李彬,等. 事件驱动型无线传感器网络生存期分析[J]. *重庆大学学报:自然科学版*,2007,30(6):30-34.
- [5] YOUNIS O, FAHMY S. Heed: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for Ad hoc sensor networks [J]. *IEEE Trans on Mobile Computing*,2004,3(4):660-669.
- [6] 刘明,龚海刚,毛莺池,等. DEEG:一种高效节能的传感器网络数据收集和聚合协议[J]. *软件学报*,2005,16(12):12-15.
- [7] WANG Y, WU H, NELAVELLI R, et al. Balance-based energy-efficient communication protocols for wireless sensor networks [C]//Proc of the 26th International Conference on Distributed Computing Systems. Washington DC: IEEE Computer Society, 2006: 85-91.
- [8] MARTINEZ K, HART J K, ONG R. Sensor network applications [J]. *IEEE Computer*,2004,37(8):50-56.