

# 分簇无线传感器网络可靠高效的数据传输方案

方维维<sup>1</sup>, 钱德沛<sup>1,2</sup>, 褚天舒<sup>1</sup>, 刘轶<sup>1</sup>

(1. 北京航空航天大学中德软件技术联合研究所, 100083, 北京; 2. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

**摘要:** 根据当前传感器节点的通信能力, 提出了一种面向大规模无线传感器网络的数据传输方案 (REDD). 在方案中, 节点间通过周期性的动态竞争产生簇首, 形成分簇网络结构. 簇内通信采用时分多路访问调度方式, 成员节点在簇首分配的时隙内经由独立的簇内通信信道将监测数据发送至簇首. 簇间通信采用载波侦听多路访问竞争方式, 簇首间形成的连通覆盖网络通过多跳转发方式将聚合后的数据发送至网关. 实验结果表明, 较之已有的研究, REDD 方案能够以更少的消耗达到更优的分簇性能, 并且在保证可靠传输的同时有效降低传输时延.

**关键词:** 无线传感器网络; 分簇性能; 信道分配; 数据传输

**中图分类号:** TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)08-0028-05

## A Reliable and Efficient Data Delivery Scheme for Clustered Wireless Sensor Networks

FANG Weiwei<sup>1</sup>, QIAN Depei<sup>1,2</sup>, CHU Tianshu<sup>1</sup>, LIU Yi<sup>1</sup>

(1. Sino-German Joint Software Institute, Beihang University, Beijing 100083, China; 2. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** According to the communication capability of current sensor nodes, a novel scheme (REDD) is proposed for data delivery in large-scale wireless sensor networks. In REDD, the clustering network architecture is formed by periodically selecting cluster heads among sensor nodes through dynamic competition. The intra-cluster communication is based on TDMA scheduling, in which a member node transmits its sensory data through an independent intra-cluster channel to its cluster head in the time slot assigned by the cluster head. The inter-cluster communication is based on CSMA competition, in which a connected overlay network is constructed among all cluster heads to forward the aggregated data through multi-hops to the sink. Simulation results show that, compared with the existing work, the REDD can achieve a better clustering performance with lower costs, and effectively reduce the end-to-end delay for reliable data transmission.

**Keywords:** wireless sensor network; clustering performance; channel assignment; data delivery

无线传感器网络 (WSN) 由大量具备数据处理能力和无线通信能力的传感器节点组成, 传感器节点在计算、存储、通信和供能等方面严重受限. 因此, 合理、有效地利用有限的节点资源来保证数据的可靠、高效传输已成为 WSN 协议设计面临的重要问

题.

与平面网络结构相比, 层次网络结构尤其是分簇网络结构更有利于减少网络的能耗, 增强网络的可扩展性, 实现数据的在网处理. 因此, 基于分簇的数据收集协议得到了广泛关注, 较为典型的有

LEACH<sup>[1]</sup>、HEED<sup>[2]</sup>和 DFA<sup>[3]</sup>等. 这些协议要求传感器节点可以使用频分多址(FDMA)或码分多址(CDMA)方式进行通信<sup>[4]</sup>,甚至要求网络中任意簇首可以与网关直接通信<sup>[3]</sup>.

目前,通用节点尚不具备这样的能力,因而实现这些协议需要扩充节点硬件,这必然会增加节点的设计复杂度和制造成本,也不利于大规模网络的部署和使用. 针对这一问题,TLTS 协议采用了相邻簇间、各簇簇内两级时分多址(TDMA)调度的方式协调数据传输<sup>[4]</sup>,即相邻的簇选择不同的 TDMA 帧进行簇内通信,以避免相互干扰,簇首间构成数据汇集树,以将监测数据转发至网关. 该协议尽管相对简单、可行,但其成簇算法开销较大且各簇节点数量严重不均,同时其传输方式影响了网络的监测力度和传输效率,进而影响了网络的实时、可靠监测.

本文在借鉴已有研究工作的基础上,提出了一种面向大规模分簇 WSN 的数据传输协议(REDD).

## 1 方案概述

### 1.1 网络模型

假设  $N$  个传感器节点随机均匀分布在一个大面积区域中,其构成的网络具有如下性质:①节点和网关部署于监测区域后不再移动,无需人为维护;②所有节点初始时具有等同的资源 and 能力,地位平等;③节点的无线发射功率强度可以根据接收端距离在一定范围内进行调整,如 Crossbow Mote 系列节点支持 100 个发射功率等级;④节点的无线射频芯片支持多信道通信,如 TI CC2420 和 Atmel AT86RF230 芯片在 ISM 频段上最多可使用 16 个信道,NORDIC nRF240X 系列芯片可使用 100 个以上的信道;⑤节点时间保持同步.

### 1.2 方案概述

在分簇 WSN 中,簇首节点负责数据收集、聚合处理和簇间转发的任务,故能量消耗远大于簇内其他节点. 为了均衡网络中节点的能量负载,REDD 方案按轮运行,每轮中节点以轮流充当簇首的方式将能量开销均匀地分布到各个节点. 分簇网络结构建立后,监测数据先由节点通过单跳通信发往簇首,在簇首经数据聚合处理后再通过簇首间多跳传输到网关<sup>[5]</sup>. REDD 的簇首节点数据收集如图 1 所示,每轮的运行流程如图 2 所示.

根据分簇网络结构的特点,REDD 方案在簇内、簇间的传输方式如下.

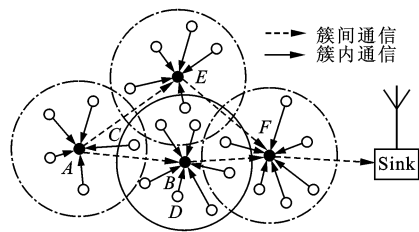


图 1 分簇无线传感器网络中的数据收集

相关成员节点分配不同的通信时隙,节点只在分配的时隙内处于活动状态,在其他时间则处于睡眠状态. 由于网络中可能存在同时处于多个簇首覆盖范围的边界节点(图 1 中的节点 C),其相邻簇间传输干扰会影响正常的收发<sup>[4]</sup>(图 1 中节点 C 向其簇首 A 发送数据时,C 的无线信号会影响簇首 B 的簇内传输). 因此,REDD 方案为彼此相邻的多个簇分配不同的簇内通信信道,以用于簇内数据收集.

(2)簇间通信基于载波监听多路访问(CSMA)竞争. 簇首间构成连通的覆盖网络并建立簇间通信生成树,传输数据的簇首选择相对条件最优的前向相邻簇首进行数据转发,直至数据到达网关(图 2 中簇首 A 可选择相邻簇首 B 或 E 进行数据转发).

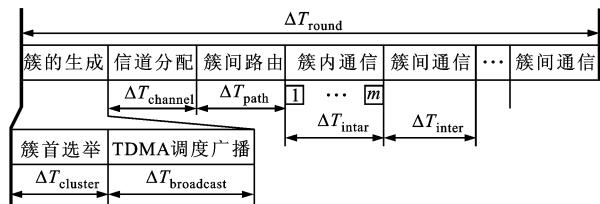


图 2 REDD 一轮中的流程示意图

## 2 簇的生成

对于任意节点,在每轮的时间段  $\Delta T_{\text{cluster}}$  内执行簇首选举算法. 为了保证簇首工作的可靠性,同时尽量减少能耗,延长网络使用寿命,REDD 方案将节点的剩余能量和通信代价分别作为选择簇首的主要参数和辅助参数. 通信代价用节点接收到的来自相邻节点广播消息的接收信号强度均值表示,即

$$\text{AvgS}_{R_r} = \sum_{n=1}^k S_{R_r}(n)/k \quad (1)$$

式中: $k$  是节点收集到的消息总数; $S_{R_r}(n)$  是第  $n$  个消息的接收信号强度.  $\text{AvgS}_{R_r}$  越大,当前节点与相邻节点的平均间距越小,以其作为簇首的簇在数据传输时的能耗就越小. 为了控制簇的规模,在 REDD 方案中假定簇半径为  $r$ ,即只允许与簇首距离不超

过  $r$  的节点加入该簇.  $r$  的大小与节点密度有关, 必须保证在任意节点的簇半径范围内有若干相邻节点存在.

$\Delta T_{\text{cluster}}$  分为 3 个连续阶段  $\Delta t_1 \sim \Delta t_3$ ,  $t$  表示  $\Delta T_{\text{cluster}}$  的开始时刻.

**算法 1** 成簇算法描述如下.

(1) 在  $\Delta t_1$  内, 节点选择时刻  $T_1$  广播 Hello\_Msg 消息

$$T_1 = t + V\Delta t_1 \quad (2)$$

式中: 随机数为  $V \in (0, 1)$ . 在该消息中包含了节点剩余能量.  $\Delta t_1$  结束时, 节点计算自身的  $\text{AvgS}_{\text{Rc}}$ .

(2) 在  $\Delta t_2$  内, 节点选择时刻  $T_2$  作为广播 Head\_Msg 消息竞争簇首的时刻

$$T_2 = t + \Delta t_1 + W\Delta t_2$$

$$W = W_e \left(1 - \frac{E_{\text{res}}}{E_{\text{max}}}\right) + W_c \left(1 - \frac{\text{AvgS}_{\text{Rc}}}{S_{\text{Tx}}}\right) + W_r V \left(1 - \frac{E_{\text{res}}}{E_{\text{max}}}\right) \quad (3)$$

式中: 权值系数  $W_e$ 、 $W_c$  和  $W_r$  满足  $W_e + W_c + W_r = 1$  且  $W_e > W_c \gg W_r$ ;  $E_{\text{res}}$ 、 $E_{\text{max}}$  分别表示当前节点的剩余能量和初始能量;  $S_{\text{Tx}}$  表示节点广播消息的发射信号强度. 如果节点在  $T_2$  时刻前没有收到相邻节点广播的 Head\_Msg 消息, 则该节点在  $T_2$  时刻广播 Head\_Msg 消息, 并成为该轮中的簇首; 如果节点在  $T_2$  时刻前已经收到了任意相邻节点广播的 Head\_Msg 消息, 则放弃簇首竞争. 由式(3)知, 剩余能量较多且  $\text{AvgS}_{\text{Rc}}$  值较大的节点, 等待消息广播的时间越少, 成为簇首的可能性更大. 在  $\Delta t_2$  结束时, 网络中每个节点在其簇半径范围内至少存在一个簇首.

(3) 在  $\Delta t_3$  内, 为了最小化簇内通信的能量消耗, 非簇首节点在时刻  $T_3$  向相距最近(接收信号强度  $S_{\text{Rc}}$  最大)的相邻簇首发送 Join\_Msg 消息, 请求加入该簇

$$T_3 = t + \Delta t_1 + \Delta t_2 + V\Delta t_3 \quad (4)$$

由于算法中消息包长均很小且广播范围有限, 因此网络中产生广播冲突的概率很小.

为了保证网络的监测质量, 传感器节点的部署密度往往很大, 因而每个簇的成员节点也会较多, 这样不但增加了 TDMA 调度结果的长度, 使得簇内收、发调度结果的能耗增大, 而且会造成 TDMA 帧时过长, 收集监测数据的延迟增大. 实际上, 同一簇内节点监测数据的关联性和冗余性很强, 因此 REDD 方案在簇首选举完成后加入了工作节点选择

机制, 即簇首选择一部分剩余能量较大的成员节点进行监测, 其他成员节点则在本轮中进入睡眠状态, 这样在满足监测质量要求的同时又保证了节点能量的有效利用. 活动节点的数目  $m$  满足如下关系<sup>[4]</sup>

$$\sum_{n=1}^m C_m^n \left(\frac{r_s}{r}\right)^{2n} \left(1 - \frac{r_s^2}{r^2}\right)^{m-n} \geq P_{\infty} \quad (5)$$

式中:  $r_s$  为节点的感知半径;  $P_{\infty}$  为当前应用要求的簇覆盖期望比率. 选择结果在  $\Delta T_{\text{broadcast}}$  时间段由簇首通过 TDMA 调度广播通知簇内各成员节点.

### 3 信道分配

如 1.2 节所述, 网络中所有节点共享一个信道同时进行簇内数据传输, 边界节点势必会影响传输的可靠性. 事实上, 当前传感器节点通用的射频芯片已经支持多信道通信, 如果相邻簇使用彼此独立的信道进行簇内通信, 则可以避免传输干扰. 信道分配问题描述如下: 如果任意 2 个相邻簇首  $A$  和  $B$  之间存在边界节点, 即存在工作节点  $c$  满足  $0 < d(A, C) \leq r$  且  $0 < d(A, B) \leq r$ , 则簇首  $A$  和  $B$  应选择不同的簇内通信信道( $d$  表示节点间距).

**定理 1** 在 REDD 方案中的信道分配算法中, 簇首所需的可选信道数上限为 19.

**证明** 如图 3 所示, 证明定理 1 等同于求解在以  $A$  为圆心、以  $2r-r$  为半径的环状区域中, 所能放置的节点数为极大值, 各节点间距大于  $r$ . 为尽可能加入更多的节点, 应使得以节点为圆心、以  $r$  为半径的圆与环状区域的重叠面积最小, 则节点应放置在环状区域外侧边缘上. 此时, 环状区域外侧边缘上最多可放置的节点数为  $\lfloor 2\pi / \angle BAC \rfloor \approx \lfloor 2\pi / (2\arcsin(1/4)) \rfloor \approx 12$  ( $B, C$  间距大于  $r$ ). 同时, 这些圆与圆  $A$  (以  $A$  为圆心以  $r$  为半径的圆) 之间会留有靠近圆  $A$  边缘的未覆盖区域 (如由圆弧切分出的区域  $DEF$ ), 在这些区域里 (近似于在圆  $A$  边缘上) 最多可放置的节点数为  $2\pi / (\frac{\pi}{3}) = 6$ . 因此, 簇首所需的

信道数上限为  $1+6+12=19$ . 这里给出的只是理论上的极值, 事实上簇首所需的信道数量远小于 19, 按目前无线射频芯片能力, 该值完全可以满足需求.

**算法 2** 信道分配算法描述如下.

(1) 未得到分配的簇首在检测到信道空闲时间达到  $\Delta t_4$  时, 稍做回退后在本簇范围内广播 Reserve\_Msg 消息, 其中包含随机选择的预约信道 ID.

(2) 簇内的边界节点若发现该信道已经被其他相邻簇首占用, 则在  $\Delta t_5$  内向该簇首反馈 Conflict\_

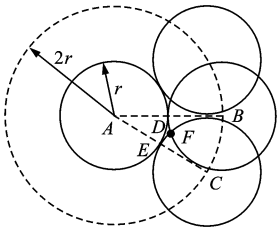


图 3 节点在环状区域上的分布

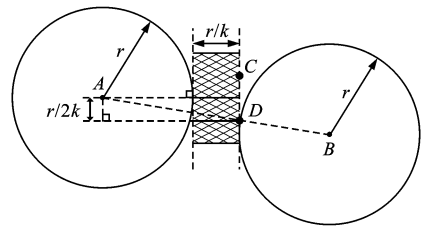


图 4 簇首 A 和相邻簇首 B 的分布

Msg 消息,簇首收到该消息后立即广播 Release\_Msg 消息声明预约信道失败(为降低网络负载和节点能耗,检测到该冲突的其他边界节点可在收到 Conflict\_Msg 或 Fail\_Msg 消息后取消自身反馈).否则,簇首在  $\Delta t_5$  结束时广播 Confirm\_Msg 消息,声明预约信道成功.为了避免竞争冲突,算法要求  $\Delta t_4 > \Delta t_5$ .

## 4 簇间转发

在簇间通信阶段,簇首收集的监测数据将通过簇首间多跳转发到网关.簇间通信半径的选择必须确保簇首构成的覆盖网络具有连通性.

**定理 2** 在网络部署区域的任意边长为  $r/k$  ( $k \geq 1$ ) 的正方形子区域中至少存在一个节点的情况下,簇间通信半径  $R$  应满足  $R \geq \left(1 + \frac{(4k^2 + 8k + 5)^{1/2}}{2k}\right)r$ .

**证明** 簇首 A 保持与网络连通的条件是  $R$  能保证它与相距最近的簇首之间能够通信,则证明定理 2 等同于求这 2 个簇首之间的最大间距.根据所给条件,图 4 中 2 个正方形子区域中至少分别存在一个节点 C 和 D,满足  $d(C, D) \leq r/k$ .如果节点 C 和 D 距离簇首 A 最远,则它们可位于所在正方形子区域的右侧边缘处,其中与簇首 A 相距最近的节点和簇首 A 的间距处于  $(r + \frac{r}{k})$  和  $\left(\left(\frac{r}{2k}\right)^2 + \left(r + \frac{r}{k}\right)^2\right)^{1/2}$  之间.同时,每个节点和其所在簇的簇首间距不大于  $r$ .易知,这 2 个间距之和的最大值即为定理所给不等式的右半部分(如图 4 线段 AB 所示),故定理 2 成立.文献[6]给出了  $k=2^{1/2}$  时的结果,经验证和定理 2 所给结果一致.

在  $\Delta T_{\text{path}}$  时间段内,由网关开始发起簇首间路由广播,广播半径为  $R$ ,从而构造出以网关作为树根的路由消息 Routing\_Msg 包含广播簇首的剩余能量  $E_{\text{res}}$  和距离网关的跳数  $H$ .在路由选择过程中,将  $\frac{\alpha S_{R_r}}{\beta(E_{\text{max}} - E_{\text{res}})}$  定义为选择前向

簇首的优先级(其中  $\alpha$  和  $\beta$  分别代表了相应的权重),簇首从  $H$  值最小的相邻簇首中选择优先级最大的簇首作为自身在生成树中的父节点.

由于在簇间通信时使用的是 CSMA 类媒体接入控制(MAC)协议,所以在应用功率控制的同时应采用一定的机制避免相邻簇首竞争信道时发生冲突和干扰,如使用最大功率发送 MAC 层控制包和使用最优功率发送数据包等.

## 5 性能分析

本文在 NS2 模拟器平台上,采用与文献[4]基本相同的实验设置对方案性能进行了仿真分析.网络中发送、接收数据的无线通信模型分别为

$$E_{\text{Tx}}(k, d) = E_{\text{elec}}(k) + E_{\text{amp}}(k, d) = \begin{cases} kE_{\text{elec}} + k\epsilon_{\text{fs}}d^2 & d < d_0 \\ kE_{\text{elec}} + k\epsilon_{\text{mp}}d^4 & d \geq d_0 \end{cases} \quad (6)$$

$$E_{\text{Rx}}(k) = E_{\text{elec}}(k) = kE_{\text{elec}} \quad (7)$$

式(6)~(7)中: $E_{\text{elec}}$ 表示无线收发模块能耗; $E_{\text{amp}}$ 表示功率放大器能耗; $\epsilon_{\text{fs}}$ 为自由空间模型系数; $\epsilon_{\text{mp}}$ 为多路衰减模型系数. $E_{\text{amp}}$ 根据收发双方间距分别采用  $\epsilon_{\text{fs}}$  和  $\epsilon_{\text{mp}}$  进行计算,具体参数设置见表 1.

表 1 实验参数设置

|                                                                            |           |                                     |       |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------|-------------------------------------|-------|
| 区域大小/ $\text{m}^2$                                                         | 200×200   | 带宽/ $\text{kb} \cdot \text{s}^{-1}$ | 115.2 |
| 网关位置/m                                                                     | (200,200) | $d_0/\text{m}$                      | 75    |
| $r/\text{m}$                                                               | 30        | 数据包长度/B                             | 75    |
| $r_s/\text{m}$                                                             | 12        | 控制包长度/B                             | 25    |
| $E_{\text{elec}}/\text{nJ} \cdot \text{b}^{-1}$                            | 50        | MAC 头部长度/B                          | 25    |
| $\epsilon_{\text{fs}}/(\text{pJ} \cdot \text{b}^{-1}) \cdot \text{m}^{-2}$ | 13        | $m$                                 | 16    |
| $\epsilon_{\text{mp}}/(\text{pJ} \cdot \text{b}^{-1}) \cdot \text{m}^{-4}$ | 0.001 3   | TDMA 时隙/ms                          | 8     |
| $N_f$                                                                      | 8         | $K$                                 | 30    |

注: $N_f$ 为 TLTS 中簇间 TDMA 帧数; $K$ 为每轮运行中网络收集次数.

在分簇性能方面,REDD 的成簇算法能保证节点在簇半径范围内至少存在一个可选簇首,从而避

免了 LEACH 协议簇首分布严重不均的问题<sup>[2]</sup>,且性能优于采用多轮循环竞争方式保证簇首分布的分簇协议(如 HEED<sup>[2]</sup>、TLTS<sup>[4]</sup>方案等).图 5 和图 6 分别给出了在不同节点密度的网络中执行一次簇首选举算法后消息广播总量和网络能量消耗(多次实验均值).

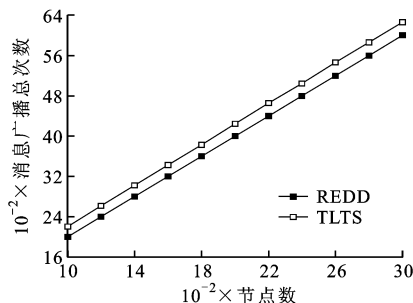


图 5 不同节点密度成簇时消息广播次数比较

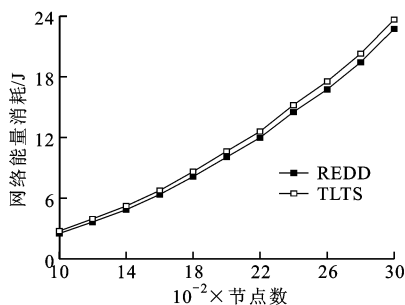


图 6 不同节点密度成簇时网络能量消耗比较

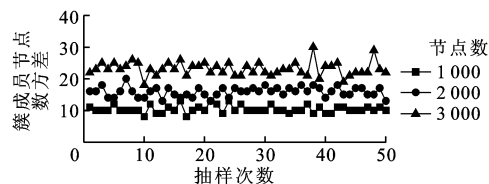
由图 5、图 6 可知,REDD 成簇的开销小于 TLTS,且随着节点密度增加节能优势逐渐明显.通过对比成簇结果发现,尽管 2 种方案均可以保证簇首覆盖全网节点且分布良好,但 REDD 中各簇的节点数量分布较为均衡,而 TLTS 中各簇的节点数量分布严重不均,部分区域甚至出现了相差极大的两极分化现象.这是因为,TLTS 中节点加入相邻簇的标准是选择接收信号强度均值( $\text{AvgS}_{R_x}$ )最大的簇首,而不是选择相距自身最近的簇首.

图 7 为不同节点密度下网络中各簇节点数量的标准差,可见在簇节点分布均衡性方面,REDD 的性能相对较优,因此 REDD 可以更好地保证网络中每个簇有足够数量的工作节点,以满足应用对网络监测质量的要求.

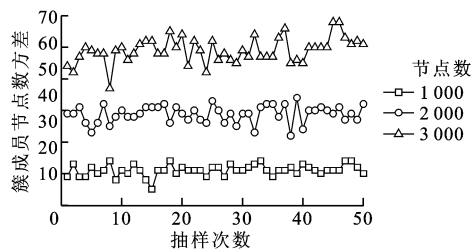
在簇间通信半径  $R$  的选择方面,可根据网络的播撒情况计算出  $R$  的理论值,并与全网中相邻簇首间最小间距的最大值  $R'$  比较.如图 8 所示,理论值均一定程度上高于实际达到网络连通所要求的半径

大小,从而验证了定理 2 的正确性.

在传输性能方面,TLTS 在整个网络完成一次数据报告的耗时为  $N_f \Delta T_{\text{intra}} + \Delta T_{\text{inter}}$ ,其中  $N_f > 1$  为簇内通信采用 TDMA 帧的个数<sup>[4]</sup>.在 REDD 中



(a) REDD



(b) TLTS

图 7 不同节点密度下簇节点数量分布均衡性比较

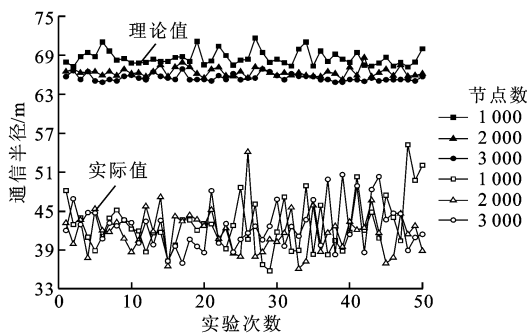


图 8 簇间通信半径选择对比

耗时仅为  $\Delta T_{\text{intra}} + \Delta T_{\text{inter}}$ .因此,在相同的时间段内,REDD 中的节点能够多次进行数据的收集和报告,监测力度相对更强.

图 9 为相同成簇结果的条件下(使用 REDD 的成簇算法)2 种方案聚合数据的网络平均传输时延对比.由于在 REDD 中簇首完成数据聚合后立即进入簇间转发阶段,相比 TLTS 减少了数据在簇首等待簇间传输的时间,因此更适用于数据的实时传输.

## 6 结束语

根据当前通用传感器节点的通信能力,提出了一种面向大规模 WSN 的数据传输方案 REDD.与已有工作相比,REDD 的贡献在于:①提出了基于节点动态竞争的簇首选举机制,保证了簇首和成员节

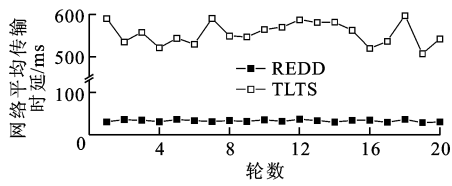


图 9 多轮运行中聚合数据的平均传输时延

点在分簇网络结构中分布良好;②通过多信道通信方式,避免了边界节点引发的相邻簇间传输干扰,保证了簇内数据传输的可靠性;③根据网络部署情况选择合适的簇间通信半径,以确保簇首覆盖网络的连通性,保证了簇间数据转发的可靠性. 仿真结果表明,相比于 TLTS,REDD 能够更有效地保证网络的监测质量和传输效率.

参考文献:

[1] HEINZELMAN W, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNA N. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2002, 1 (4): 660-670.

[2] 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.

[3] WAHARTE S, BOUTABA R. Performance comparison of distributed frequency assignment algorithms for wireless sensor networks [C]// Proceedings of Net-Con. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2004: 217-228.

[4] 龚海刚, 刘明, 王晓敏. TLTS:大规模无线传感器网络下基于簇的两级TDMA 调度协议 [J]. 计算机研究与发展, 2007, 44(1): 71-77.

GONG Haigang, LIU Ming, WANG Xiaomin. A cluster-based two level TDMA scheduling protocol for large scale wireless sensor network [J]. Journal of Computer Research and Development, 2007, 44(1): 71-77.

[5] 王毅, 张德运, 梁涛涛. 无线传感器网络分区能耗均衡的非均匀分簇算法 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(4): 389-394.

WANG Yi, ZHANG Deyun, LIANG Taotao. Cell energy balanced uneven clustering hierarchy scheme for wireless sensor networks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(4): 389-394.

[6] LIN C H, TSAI M J. A comment on “HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach

for ad hoc sensor networks” [J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2006, 5(10): 1471-1472.

(编辑 苗凌)