

# DEED:一种无线传感器网络中高效节能的数据通信协议

龚海刚,刘 明,陈力军,谢 立

(南京大学计算机软件新技术国家重点实验室,江苏南京 210093)

**摘 要:** 无线传感器网络由许多具有低功率无线收发装置的传感器节点组成,能够有效地从不同环境监测收集周边环境信息并传送到远处的基站进行处理.由于传感器节点的电池能量极为有限,因此节点的通信应有效的利用能量,以延长网络的生命周期.LEACH<sup>[4]</sup>协议是一种典型的能有效延长网络生命周期的节能通信协议.本文提出了一种分布的、高效节能的通信协议 DEED,DEED 利用了数据聚合技术,以聚类的方式组织节点,聚类首领在网络中均匀分布并组织成路由树,由根节点与基站直接通信.实验结果显示 DEED 性能远好于 LEACH.

**关键词:** 无线传感器网络;高效节能;聚类;分布的

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 08-1391-06

## Distributed Energy Efficient Data Gathering in Wireless Sensor Networks

GONG Hai-gang, LIU Ming, CHEN Li-jun, XIE Li

(State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

**Abstract:** Wireless sensor network consisting of a large number of small sensors with low-power transceiver can be an effective tool for gathering data in a variety of environment. The collected data must be transmitted to the base station for further processing. Since a network consists of sensors with limited battery energy, the method for data gathering and routing must be energy efficient in order to prolong the lifetime of the network. LEACH<sup>[4]</sup> is an elegant energy efficient protocol to maximize the lifetime of sensor network. In this paper, we presented DEED, a distributed energy efficient protocol with data fusion technology. DEED clusters nodes into groups and builds routing tree among cluster heads, among which only the root node communicates the base station directly. Simulation results show that DEED performs far better than LEACH.

**Key words:** wireless sensor networks; energy-efficient; clustering; distributed

## 1 引言

随着传感器技术、嵌入式计算技术、低功耗无线通讯技术的飞速发展,具备感应、无线通讯以及信息处理的能力的微型无线传感器也开始出现.这些廉价的、低功率的传感器组织成无线网络,能够协作地监测、感应其网络覆盖区域内的多种环境信息并传送到远处的基站进行处理.无线传感器网络(Wireless Sensor Networks)能够在恶劣的环境条件下获取大量详实而可靠的信息,可以广泛应用于国防军事、工业控制、环境监测、交通管理等领域<sup>[1,2]</sup>.

与传统的无线网络不同,无线传感器网络中的节点带宽、内存等资源更为匮乏,尤其是其有限的能量直接影响传感器网络的生命周期以及网络的信息质量.由于传感器节点的能量通常无法得到补充,节点上的通信协议应能够有效地利用节点有限的能量,以延长网络的生命周期.

本文提出了一种完全分布的、高效节能的数据通信协议 DEED,其特点是节点以聚类的方式组织节点,聚类覆盖的区域大小是限制在一定范围内,节点根据本地信息独立地决定成为聚类首领或某个聚类的成员.聚类首领均匀地分布在网络中,所有的聚类首领根据其权值组织成一棵路由树,由根节点收集其它聚类首领的数据并向基站传送.模拟实验显示 DEED 具有良好的性能.

## 2 背景

### 2.1 相关工作

对于传感器网络中节能的数据通信由协议的研究已有不少<sup>[3-8]</sup>.最简单的数据通信由协议是直接通信(Direct Transmission),即节点收集数据后直接与基站通信.显然,当基站距离很远时,节点的通信代价太大,将很快死亡.

LEACH<sup>[3,4]</sup>是 MIT 的 Wendi 等人为无线传感器网络设计

收稿日期:2004-08-09;修回日期:2005-03-02

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(No. 2002CB312002);国家 863 高科技项目(No. 2001AA113050)

的低功耗自适应聚类数据通信协议,其基本思想是减少与基站直接通信的节点数目,并通过数据聚合技术(Data fusion)减少通信能量的损耗。LEACH 分为设置和稳定工作两个阶段。在设置阶段,首先随机选出若干聚类首领(cluster head),聚类首领向所有节点广播此消息,其余节点依据接收信号的强弱加入就近的聚类。在稳定工作阶段,节点持续采集监测的数据,并传至聚类首领,聚类首领将所有成员的数据进行数据聚合后发送给远端的基站。由于聚类首领收集成员的数据并完成发送数据到远端基站的任务,因此能量损耗较快。为此 LEACH 提出了“轮”(round)的概念,每轮选取新的聚类首领,重复两个阶段的工作,从而保证网络中能量的损耗能分布在所有节点中。此外,聚类首领利用数据聚合技术将多个信号聚合为一个有效的信号,使得通信量大大降低,也极大地减少了能量的消耗。与直接通信方式相比,LEACH 的网络生命周期可延长 4~8 倍。

PEGASIS<sup>[5]</sup>则由 LEACH 发展而来,其思想是进一步减少直接与基站通信的节点。PEGASIS 将网络中所有节点连成一条链,指定某个节点作为与基站通信的节点。收集数据时,链端的节点将其数据发送给下一节点,此节点将自身数据和接收的数据聚合后又转发至下一节点,如此直至与基站通信的节点,由该节点将聚合后的数据发送给基站。在通信过程中,所有中间节点都接收并发送数据一次,同时各节点轮流充当与基站通信的角色,能量的消耗进一步均匀分布在所有节点中。研究表明,采用 PEGASIS 的网络生命周期是 LEACH 的 1~3 倍。PEGASIS 协议的不足之处在于节点需要维护全局的位置信息,以及数据的延迟较大。网络规模较大时,其建链及维护代价相当可观。

PEDAP<sup>[6]</sup>是最近由 Tan. 等提出的一种集中式的节能数据收集算法,PEDAP 假定基站知道所有节点的位置信息。根据这些信息,基站得到一棵最小代价的生成树,并将此路由信息广播给网络中的节点,节点从而知道自身的父节点和子节点信息,数据传输过程中节点等待子节点的数据聚合后发往父节点,并由根节点传送至基站。由于基站知道所有节点的位置信息,因此此生成树的通信能量损耗是最小的。PEDAP 的性能与 LEACH 和 PEGASIS 相比,有了显著的提高。但是 PEDAP 协议的容错性较差,基站仅根据预定的能量模型判断每个节点是否因能量耗尽而死亡,而实际环境中,节点通常由于其它原因故障,此时网络将瘫痪。

## 2.2 无线信道传输模型

在无线传输中,发射功率的衰减随着传输距离的增大而呈指数衰减。文献[11]中提出了两种信道模型,自由空间(free space)模型和多路径衰减(multi-path fading)模型,当发送节点和接收节点之间的距离  $d$  小于某个值  $d_0$  时,采用自由空间模型,发射功率呈  $d^2$  衰减;否则采用多路径衰减模型,发射功率呈  $d^4$  衰减。

## 2.3 无线能量模型

本文采用与文献[4]相同的无线能量模型,式(1)为发射  $k$  比特数据耗损的能量,由发射电路耗损和功率放大耗损两部分构成。功率放大耗损则根据发送者和接收者之间的距离

分别采用自由空间模型和多路径衰减模型。 $E_{elec}$  为发射电路的耗损能量, $f_s$ 、 $amp$  分别为两种信道模型下功率放大所需能量。式(2)为接收  $k$  比特数据的能量耗损,仅由电路耗损引起。

$$E_{Tx} = \begin{cases} k * E_{elec} + k * f_s d^2, & d < d_0 \\ k * E_{elec} + k * amp d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$E_{Rx} = k * E_{elec} \quad (2)$$

此外,对数据信号进行聚合等处理时也将耗损能量,由  $E_{DA}$  表示聚合单个数据信号所耗损的能量。对于聚类首领,假设其聚类成员数为  $M$ ,则将  $M$  个成员的数据信号和自身的数据信号聚合为一个有效信号耗损的能量为  $E_C = (M + 1) * E_{DA} * k$ 。

## 3 问题描述

设计有效利用能量的路由协议的原则是使每轮数据收集的总能耗最小,同时保证能量的损耗均匀分布在所有节点上。基于聚类的路由协议能有效利用能量,延长网络的生命周期。在传感器网络中基于聚类的通信协议应该满足以下几个目标:

(1) 网络中节点之间的通信,包括聚类成员与首领的通信、聚类首领之间的通信,应该遵循自由空间模型,避免远距离传输的高能量衰减,因此聚类的大小应该限制在一定范围内。在 LEACH 协议中,成为首领的节点在全网范围内广播此消息,其功率衰减遵循多路径衰减模型,而所有其它节点接收此消息也将损耗一定的能量,事实上对于多数未成为此聚类成员的节点而言,接收此消息的能量损耗是不必要的。同时这些随机选取的聚类首领,可能在网络的边缘,如图 1 所示,  $A \sim D$  为聚类首领。成员与  $A$ 、 $C$  的距离较远,势必增加通信能量的消耗。在网络覆盖区域很大的情况下,成员与聚类首领间的通信能量急剧上升,能量耗损将相当可观。

(2) 协议是完全分布的,节点完全根据本地信息决定自身的状态,无需知道其它节点的位置,具有良好的伸缩性。在 PEDAP<sup>[6]</sup> 协议中,基站知道所有节点的位置信息并据此计算出最小代价的生成树,这种集中式的算法显然伸缩性太差。而且在实际环境下,获得节点的位置信息代价是比较大的(如 GPS 等)。同样,PEGASIS 也需要知道所有节点的全局信息才能建立一条优化链。

(3) 聚类首领彼此不能相距太近,应较为均匀地分布在网络中。在 LEACH 中,随机选取的聚类首领可能相距很近,如图 1 中的  $B$ 、 $C$  节点,接收成员的数据时,可能会由于电磁波的互相干扰导致数据的重发,引起不必要的能量损耗。

在我们设计的 DEED 中,聚类覆盖的区域大小是限制在半径为  $r$  的区域内,即在聚类首领通信半径  $r$  内的节点才能成为此聚类的成员。 $r$  称为聚类半径,其值应小于  $d_0/2$ ,目的是为了保证聚类首领之间的距离限制在  $d_0$  范围内,这样网络中成员到聚类首领的通信以及聚类首领之间的通信都基于自由空间的低能量衰减。DEED 还保证随机选出的聚类首领不在彼此的聚类半径内,以减小聚类之间的通信干扰。同时,各聚类首领根据自身的能量等本地信息,创建一棵路由

树,由树根的聚类首领将其它聚类首领的数据聚合后传送到基站,以减少直接与基站通信的节点.图2是DEED协议的聚类示意图.

本文假定  $N$  个传感器节点随机均匀分布在矩形区域  $A$  内,并假设传感器网络具有如下性质:

- (1) 传感器节点和基站是静止不动的,基站在区域外的某一位置;
- (2) 节点不知道自身的位置信息;
- (3) 所有节点的能力,并具有数据聚合的能力;
- (4) 节点的发射功率是可控的,即可根据发射距离的远近调整发射功率的大小.

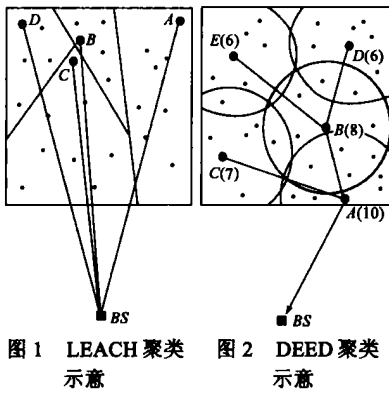


图1 LEACH 聚类示意图

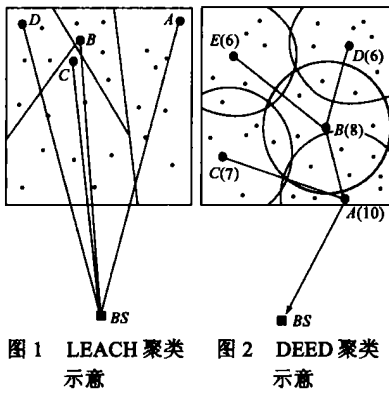


图2 DEED 聚类示意图

#### 4 DEED 协议描述

与 LEACH 相似,DEED 协议按轮运行,每轮分为设置阶段和稳定工作阶段.设置阶段选出聚类首领,由聚类首领给成员分配 TDMA 时隙,同时在聚类首领之间建立一棵路由树.在稳定工作阶段,聚类的成员按分配好的 TDMA 时隙将数据发送至聚类首领,聚类首领将数据聚合后转发至其父节点,如此直至根节点,由根节点将数据传送到基站.经过一轮数据收集后,将选取新的聚类首领,如此重复两个阶段的工作.为了减小设置阶段的开销,稳定工作时间应比设置阶段长,通常称收集一次所有节点的数据为 Cycles,每轮可进行多次 Cycles,以减少网络设置的次数.

为便于描述,说明符号如下:

$P_{init}$ :决定聚类首领初始数目的百分比,与最终聚类的数目无关.聚类首领的最小优化数目可由文献[9]定义,即最小数目为  $2A/\sqrt{27} \cdot r^2$ ,故可定义  $P_{init} = 2A/N\sqrt{27} \cdot r^2$ ,其中  $A$  为区域面积, $r$  为聚类半径, $N$  为传感器节点数目.

$E_{threshold}$ :节点能量的阈值, $E_{cur}$  小于此值时不再参与聚类首领的竞争.

$P_C$ :节点成为聚类首领的几率,与能量相关, $P_C = P_{init} * E_{cur}/E_{max}$ ,其中  $E_{cur}$  为节点当前能量, $E_{max}$  为节点初始能量.

$S_C$ :候选的聚类首领集合,节点接收到 CANDINDATES 消息时,将发此消息的节点放入此集合,候选节点的  $S_C$  还包括自身;接收到 CANCEL 消息时,将发此消息的节点从  $S_C$  中删除.

$S_H$ :最终的聚类首领集合,节点接收到 HEAD 消息时,将发此消息的节点放入此集合.

$r_{SS}$ 、 $r_{SS}$ :分别为节点接收到聚类首领、基站发出的测试信号的强度,可据此信号强度估计与聚类首领或基站的距离,信号越强,表明与发射源的距离越近.

$Bids$ :节点竞争聚类首领的出价.

##### 4.1 聚类形成算法

聚类形成算法与文献[10]类似,代码如图3第1~27行所示.各节点独立地运行此算法,算法由一段循环体构成.只有节点当前能量大于  $E_{threshold}$  且其  $S_C$ 、 $S_H$  集合为空才有资格竞争聚类首领.节点首先以几率  $P_C$  向其聚类覆盖半径  $r$  内的节点广播 CANDINDATES 消息,成为候选节点,并放入本节点的集合  $S_C$  中(图3 6~9行).CANDINDATES 消息包含本节点 ID 及竞争出价  $Bids$ .然后等待时间  $T$ , $T$  的设置应足够长以便能收到其通信半径  $r$  内的其它节点发送的消息. $T$  时间后若候选节点的  $S_C$  集合只包含自身 ID,表明本节点覆盖半径  $r$  内没有其它节点竞争聚类首领,节点广播 HEAD 消息,宣布正式成为聚类首领;否则在集合  $S_C$  中选出出价最高的候选节点(出价相同时比较节点 ID),若此节点 ID 为本节点,本节点广播 HEAD 消息成为聚类首领(13~16行);若出价最高的节点不是本节点,将继续等待时间  $T$ ,等待接收出价最高节点发出的 HEAD 消息.在  $T$  时间后,如果这些候选节点收到了 HEAD 消息,则广播 CANCEL 消息,其覆盖半径  $r$  内的节点将从  $S_C$  集合中删除此候选节点;否则这些候选节点将重复上述过程,若直到  $P_C$  为 1 时仍未收到 HEAD 消息,则宣布自己成为聚类首领(18~24行).

对于非候选节点,接收到 CANDINDATES 消息后暂时失去竞争权,并等待  $T$  时间接收其  $S_C$  内出价最高节点发出的 HEAD 消息.若收到此 HEAD 消息,则不再参与竞争,在剩余的循环步骤内接收其它可能的 HEAD 消息;若收到 CANCEL 消息,表明其  $S_C$  内的候选节点与其它候选节点竞争时失败,本节点将此候选节点从  $S_C$  中删除,若  $S_C$  为空,则本节点将恢复竞争权,再次竞争聚类首领(4~5行).否则继续等待  $S_C$  中其它候选节点发送的消息.循环结束后,若集合  $S_H$  非空,则选取出价最高的节点,并向其发送 JOIN 消息加入此聚类;否则表明本节点未在选出的聚类首领的覆盖范围内,将直接广播 HEAD 消息,宣布成为聚类首领.

// Cluster formation

1. electable = FALSE
2.  $P_C = \max(P_{init} * E_{cur}/E_{max}, P_{init} * E_{threshold}/E_{max})$
3. DO
4. IF  $S_H = \text{空}$  and  $S_C = \text{空}$  and  $E_{cur} > E_{threshold}$
5. electable = TRUE
6. IF  $\text{random}(0,1) \leq P_C$  and electable
7. Broadcast (myID, CANDINDATES, Bids)
8. myID -  $>$   $S_C$
9. is Candidate = TRUE
10. Wait  $T$
11. IF  $S_C' = \text{空}$
12. electable = FALSE
13. IF is Candidate
14. IF myID = MaxBids nodeID in  $S_C$
15. Broadcast (myID, HEAD)
16. break

```

17. Wait T
18. IF is Candidate
19.   IF  $S_H = \text{空}$ 
20.     Broadcast(myID, CANCEL)
21.     is Candidate = FALSE
22.   ELSE
23.     IF  $P_C = 1$ 
24.       Broadcast(myID, HEAD)

25.    $P = P_C$ 
26.    $P_C = \min(P_C * 2, 1)$ 
27. WHILE(  $P = 1$ )

28. IF  $S_H \neq \text{空}$ 
29.   headID = MaxBids nodeID in  $S_H$ 
30.   Send(myID, JOIN) to headID
31. ELSE
32.   Broadcast(myID, HEAD)

// Routing tree building
33. IF is Clusterhead
34.   Broadcast(myID, WEIGHT)
35.   Wait T
36.   ParentNode = Neighbor which send Max WEIGHT
37.   Send(myID, CHLD) to ParentNode

```

图3 DEED 协议伪代码

如图4中,节点  $n_1$  和  $n_2$ 、 $n_2$  和  $n_3$ 、 $n_4$  在彼此的覆盖半径  $r$  内,同时广播 CANDIDATES 消息.假设竞争出价  $n_1 > n_2 > n_3 > n_4$ ,则  $n_1$  将广播 HEAD 消息,成为聚类首领, $n_2$  收到此 HEAD 消息后广播 CANCEL 消息, $n_3$ 、 $n_4$  收到  $n_2$  的 CANCEL 消息后将  $n_2$  从其

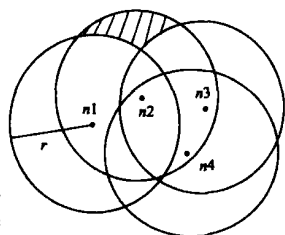


图4 节点竞争聚类首领示意

$S_C$  中删除,若随后的过程中  $n_3$  与  $n_4$  竞争, $n_3$  将成为聚类首领.而在阴影区域内的节点收  $n_2$  的 CANCEL 消息将  $n_2$  从  $S_C$  中删除后,若  $S_C$  为空,将重新加入竞争行列.

竞争出价 Bids 可以是节点的当前能量,能量大者优先成为聚类首领;也可以是平均接收信号强度,即节点覆盖半径  $r$  内的所有其它节点接收到此节点发出的测试信号强度的平均值.  $Bids = \frac{\sum_{i=1}^n RSS_i}{n}$ ,其中  $n$  为此节点覆盖半径  $r$  内的其它节点数目.平均信号强度越大,此聚类的平均通信能量损耗就越小.但后者需要额外的控制消息开销,以获得本节点覆盖半径  $r$  内的平均接收信号强度.若采用此策略,节点在发出 CANDIDATES 消息前需先广播测试信号,获得平均接收信号强度.图3的算法中没有特别说明.如果有些节点失效,计算平均接收信号强度时将收不到这些节点的应答,自动将这些失效的节点排除在外,从而具有一定的容错性.

## 4.2 路由树的生成

图3中第33~37行为路由树的生成算法.聚类形成后,聚类首领在其覆盖半径  $2r$  内广播 WEIGHT 消息,消息包含其节点 ID 及权值  $W$ .各聚类首领比较自身的权值和收到的 WEIGHT 消息中包含的权值,若本节点权值较小,则选择权值最大的节点作为父节点,并发送 CHLD 消息通知父节点,这样权值最大的节点将成为树的根节点;若节点未收到任何 WEIGHT 或 CHLD 消息,说明此聚类周围没有其它聚类存在,将直接与基站通信.这种情况可能发生在节点已绝大部分死亡或节点密度小导致聚类的分布较为稀疏时.如图2所示, $A \sim E$  为聚类首领,括号内为其权值, $B$  将收到  $A, C, D, E$  的 WEIGHT 消息,并选择  $A$  作为父节点,同理, $D, E$  选择  $B$  作为父节点, $C$  选择  $A$  为父节点,而  $A$  收到的  $B, C$  发送的 WEIGHT 消息中的权值比其小,故  $A$  将直接与基站通信,如此建立起一棵路由树.

权值综合考虑了节点能量和距基站的距离,  $W_i = E_{cur} / E_{max} * RSS_i$ ,  $RSS_i$  的值在网络启动时由基站广播测试信号得到,在网络生命周期是不变的.这样,距离基站较近且能量足够的簇头节点将优先成为根节点.若发生权值相等的情况,则根据节点的 ID 大小来选择父节点.

## 5 性能评价

我们采用 GomoSim 作为实验平台,模拟实现了 LEACH、PEGASIS 和 DEED 协议并进行了性能比较.其中 DEED 协议根据聚类首领的选举出价类型分为 DEED-E 和 DEED-S,前者表示竞争聚类首领的出价为节点的能量,后者表示出价为节点的平均接收信号强度.对于 PEGASIS,由于其网络假设条件不同,仅作参考.分别在大小两个场景中进行了模拟,其中场景 I 的区域大小为  $100\text{m} \times 100\text{m}$ ,基站位于坐标  $(50, 250)$ ;场景 II 中节点分布在  $200\text{m} \times 200\text{m}$  的区域内,基站坐标为  $(100, 400)$ .模拟实验的其它参数见表1所示,后7个参数与文献[4]中相同.

表1 实验模拟参数

	场景 I	场景 II
区域大小	$(0, 0)$ to $(100, 100)$	$(0, 0)$ to $(200, 200)$
节点数量	100	400
基站位置	$(50, 250)$	$(100, 400)$
初始能量	2J	
聚类半径 $r$	40m	
数据包长度	525Bytes	
$E_{threshold}$	0.01J	
$E_{elec}$	50nJ/bit	
$f_s$	10nJ/bit/m <sup>2</sup>	
$amp$	0.0013pJ/bit/m <sup>4</sup>	
$E_{DA}$	5nJ/bit/signal	
$d_0$	86.2m	

### 5.1 评价指标

生命周期:从网络启动到节点死亡所持续的时间,以“轮”(rounds)来表示.可定义为三种形式:第一个节点死亡

(First Node Died)、一半节点死亡(Half Node Died)和全部节点死亡(Last Node Died)。

数据精度:基站接收到的感知信息的精度,收到的信息量越多,数据精度越高。文献[4]中认为,聚类首领将成员的数据信号聚合为一个信号传送,此聚合信号包含的信息量包括此聚类所有节点的信息,因此数据精度以所有节点在网络生命周期中发送的数据信号的多少来表示。

5.2 实验结果与分析

图5、图6分别为两个场景下的网络生命周期。在场景 I 中 DEED 的第一个节点死亡的时间(FND)是 LEACH 的 4.4 倍,全部节点死亡(LND)的时间是 LEACH 的 1.5 倍左右。这表明 DEED 协议使能量的损耗更加均匀的分布到所有节点中,避免了单个节点因能量损耗过大而过早死亡。与 PEGASIS 相比,DEED 协议的 FND 和 LND 时间分别比其提高了 30%和 5%。在场景 II 中 DEED 的优势进一步得到体现,其 FND、LND 时间分别是 LEACH 的 22 倍、1.8 倍,这是因为在大场景环境下,LEACH 的聚类成员与聚类首领的通信距离加大,聚类内部的通信能量损耗也随之加大,而 DEED 中成员与聚类首领的通信距离则限制在聚类半径 r 内,因此其聚类内部通信能量损耗不会随区域的增大而增加。此外,DEED-S 的 FND 比 DEED-E 的时间短,LND 时间比 DEED-E 长。这是因为在 DEED-S 中,聚类首领竞争出价为节点的平均接收信号强度,但是平均接收信号强度最大的节点其能量可能相对较小,因此聚类首领死亡较早,而对于整个网络,由于各聚类的通信代价是相对最小的,因此每轮的能量损耗相对较小,故其全部节点死亡的时间更长。

时间呈缓慢减小的趋势,其 LND 时间则逐步增大,且 DEED 的增加幅度较大。这是由于对基于聚类的协议,节点密度增加意味着聚类成员的增多,聚类首领的能量消耗较大,故 FND 时间较短;而节点增加,使得在网络生命后期具有相对较高能量的节点的几率越高,从而使得 LND 时间越长。对于 PEGASIS,能量利用较为均匀,故其 FND 时间波动不大。

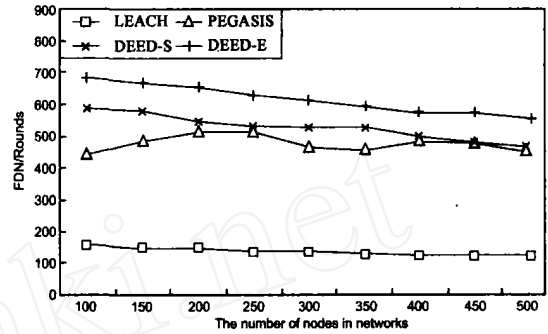


图 7 节点密度和 FND 的关系(场景 I)

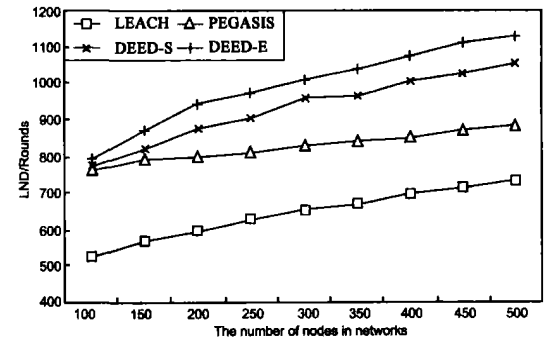


图 8 节点密度和 LND 的关系(场景 I)

图9、10是两个场景下节点发送的数据信号与能量消耗之间的关系,能量消耗包括设置阶段和稳定阶段两部分的能

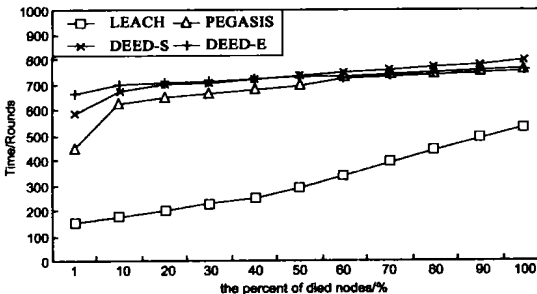


图 5 网络生命周期(场景 I)

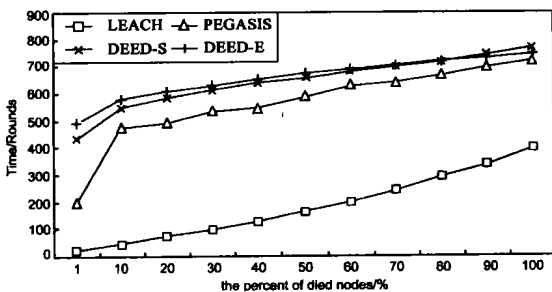


图 6 网络生命周期(场景 II)

图7、8为场景 I 中不同节点密度的环境下(节点数目由 100 至 500),采用各协议的网络 FND 时间和 LND 时间的比较。可以看出,随着节点密度的增大,DEED 和 LEACH 的 FND

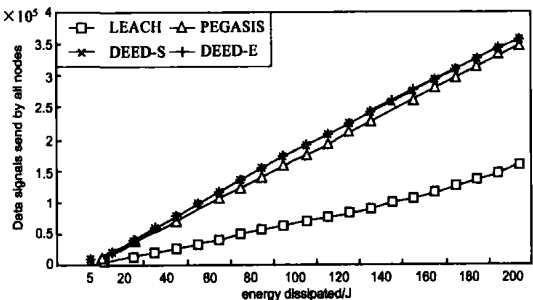


图 9 节点发送的数据信号与能耗的关系(场景 I)

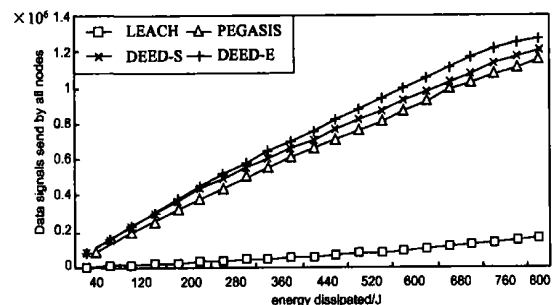
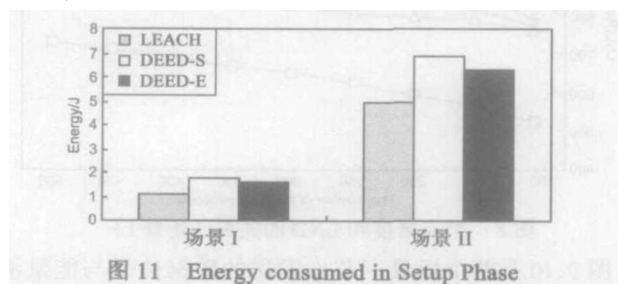


图 10 节点发送的数据信号与能耗的关系(场景 II)

量消耗.在设置阶段,LEACH 和 DEED 的能量主要消耗在聚类形成过程中,DEED 还包括生成路由树时所消耗的能量,PEGASIS 为生成传输链所消耗的能量;而稳定阶段则均为数据收集时所消耗的能量.在场景 I 中,DEED 传送的数据信号仅比 LEACH 多 1.3 倍,而在场景 II 中,DEED 传送的数据信号是 LEACH 的 70 余倍.这表明 DEED 的能量利用更加有效,相同的能量能传送更多的数据.能量的均匀损耗使得 DEED 的 FND 大大高于 LEACH,即 DEED 比 LEACH 在更多的时间内是全部节点发送数据,因此其传送的数据量远高于 LEACH.值得注意的是,虽然 DEED-E 的 LND 时间比 DEED-S 的短,但其传送的数据信号却比后者高些,这也是由于 DEED-E 的 FND 时间较长的缘故.

图 11 为 DEED 和 LEACH 协议在设置阶段所消耗的能量.由图可知 LEACH 在设置阶段的能耗较小,约占总能耗的 0.5%,DEED 的能耗稍高于 LEACH,占总能耗的 0.8%左右.这是由于 DEED 协议除了形成聚类时消耗能量外,在生成路由树时还要消耗额外的能量.由于 DEED-S 在设置阶段时需发送测试信号计算平均接收信号强度,因此其消耗的能量略大于 DEED-E.尽管 LEACH 在设置阶段消耗的能量少,但在稳定阶段 LEACH 进行数据收集时能量将浪费在远距离传输上,每轮的能耗反而比 DEED 高,因而网络生命周期短于 DEED.



## 6 结论

本文提出了一种分布式的、高效节能的聚类数据通信协议 DEED,各节点独立地执行 DEED 协议,聚类大小限制在一定范围内,聚类首领不在彼此的聚类半径范围之内.聚类形成后,聚类首领根据本地信息(权值),在聚类首领之间创建一棵路由树,有树根节点将其它聚类首领节点的数据聚合后传送至基站.模拟实验显示,DEED 的性能远高于 LEACH,尤其是在大场景的环境下.与 PEGASIS 相比,DEED 的 FND 时间比其约长 30%左右,整体性能相当.但前者对节点的要求较高(需知道节点位置),在实际环境中,只需维护本地信息的 DEED 将更为实用.

我们下一步的工作是将解决覆盖问题<sup>[12]</sup>的思想引入聚类,在聚类内部寻找多个覆盖集,数据收集时只激活其中一个覆盖集,其余节点处于休眠状态,网络的生命周期将成倍提高.

## 参考文献:

[1] D Estrin, et al. Next century challenges: Scalable coordination in sensor

networks[A]. Proc. of MobiCOM[C]. Seattle, USA: ACM press, 1999. 263 - 270.

- [2] M Tubaihsat, S Madria. Sensor networks: An overview[J]. IEEE Potentials, 2003, 22(2): 20 - 23.
- [3] W R Heinzelman, et al. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[A]. Proc. of 33<sup>rd</sup> Annual Hawaii Inter Conf on System Sciences[C]. Hawaii, USA: IEEE Computer Society, 2000, 8. 20 - 30.
- [4] W R Heinzelman, et al. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660 - 670.
- [5] S Lindsey, et al. Pegasus: Power efficient gathering in sensor information systems[A]. Proc. of IEEE Aerospace Conf. [C], Montana, USA: IEEE Computer Society, 2002. 23 - 29.
- [6] Huseyin Ozgur Tan, et al. Power efficient data gathering and aggregation in wireless sensor networks[J]. SIGMOD Record, 2003, 32(4): 66 - 71.
- [7] S Bandyopadhyay, et al. An energy-efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks[A]. Proc. of IEEE INFOCOM [C]. San Francisco, USA: IEEE Computer Society, 2003. 1713 - 1723.
- [8] Manjeshwar A, et al. TEEN: A routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks[A]. Proc. of PDPS[C]. San Francisco, USA: IEEE Computer Society, 2001. 35 - 43.
- [9] R Williams. The Geometrical Foundation of Natural Structure: A Source Book of Design[M]. New York: Dover Pub. Inc., 1979.
- [10] O Yoniss, et al. HEED: A Hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad-hoc sensor networks[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2004, 3(4): 366 - 379.
- [11] T Rappaport. Wireless Communications: Principles and Practice[M]. New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1996.
- [12] Chi-Fu Huang, et al. The coverage problem in a wireless sensor network[A]. Proc. of WSNA[C]. San Diego: ACM press, 2003. 115 - 121.

## 作者简介:



龚海刚 男, 1975 年生, 江西南昌人. 现为南京大学计算机科学与技术系软件理论专业博士研究生, 主要研究方向为移动计算, 传感器网络技术, P2P 计算. E-mail: ghgang@dislab.nju.edu.cn.



刘明 男, 1973 年生, 四川成都人, 现为南京大学计算机科学与技术系软件理论专业博士研究生, 主要研究方向为移动计算, 传感器网络技术, P2P 计算.