

无线传感器网络能效时延平衡数据收集机制

郑杰^{1,2}, 郭淑杰^{1,2}, 屈玉贵^{1,2}, 张英堂^{1,2}, 赵保华²

(1. 中国科学技术大学电子工程与信息科学系, 安徽合肥 230027; 2. 网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876)

摘要:在追求无线传感器网络高能量效率的同时,考虑数据汇聚时延,提出了一种能效与时延平衡的数据收集机制(energy efficiency and delay balancing data gathering, EEDBDG). 该机制采用一种新型动态树来组织网络拓扑,消除了“热区”问题,节点动态选择路由并轮换充当树根,根节点收集数据并与基站直接通信. 同时,针对不同的时延和能效要求,提出了3种数据收集策略:时延最优算法(EEDBDG-D),能效最优算法(EEDBDG-E)和能效时延平衡算法(EEDBDG-M). 仿真结果表明,在节点通信半径受限的情况下,EEDBDG平衡了节点能量消耗,延长了网络生命时间,在节能与省时上均表现出了突出的性能. 与GSEN相比,在最好情况下,EEDBDG-E网络生命期提高了72%,EEDBDG-D汇聚时延降低了74%.

关键词:无线传感器网络; 能量效率; 时延; 动态树; 数据收集

中图分类号: TN929.53 **文献标识码:** A

Energy efficiency and delay balancing data gathering for wireless sensor networks

ZHENG Jie^{1,2}, GUO Shu-jie^{1,2}, QU Yu-gui^{1,2}, ZHANG Ying-tang^{1,2}, ZHAO Bao-hua²

(1. Department of Electronic Engineering and Information Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing 100876, China)

Abstract: Considering data gathering delay while seeking high energy efficiency in wireless sensor networks, an energy efficiency and delay balancing data gathering scheme (EEDBDG) was proposed. EEDBDG organized the topology based on a novel dynamic tree and avoided the hot spot problem. The nodes selected routing paths dynamically and took turns to act as the root of the tree. The root node gathered the data and communicated with the base station directly. In EEDBDG, three data gathering strategies were proposed for different requests for delay and energy efficiency. These were optimum delay algorithm (EEDBDG-D), optimum energy efficiency algorithm (EEDBDG-E) and a compromise algorithm (EEDBDG-M). In the case where the sensor node communication radius was restricted, simulation results show that EEDBDG equalizes the energy consumption of all the nodes, prolongs the network lifetime and achieves an outstanding performance in energy-saving and time-thrift. Compared with GSEN, in the best case, the network lifetime using EEDBDG-E is prolonged by 72% and the data gathering delay using EEDBDG-D is decreased by 74%.

Key words: wireless sensor networks; energy efficiency; delay; dynamic tree; data gathering

收稿日期:2007-04-03; 修回日期:2007-06-19

基金项目:国家自然科学基金项目(60872009, 60602016), 国家重点基础研究发展(973)计划(2003CB314801), 国家高技术研究发展(863)计划(2007AA01Z428), 安徽省高校自然科学研究计划重大项目(ZD2008005-2), 华为基金(YJCB2007061WL)资助.

作者简介:郑杰,男,1982年生,博士生. 研究方向:无线传感器网络. E-mail: zhengms@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:屈玉贵,教授. E-mail: ygqu@ustc.edu.cn

0 引言

无线传感器网络作为沟通人和物理世界的桥梁,具有广阔的应用前景,近年来在学术界和工业界引起广泛关注^[1,2]. 由于无线传感器网络是能量受限的,为了尽可能延长网络生命期,在研究与设计网络时,能量效率是最重要的性能指标. 对于传统的用于区域监测的传感器网络,数据汇聚时延也是影响网络运行的一个重要因素. 目前提出的很多数据收集协议要么在协议设计时没有考虑到时延,如 LEACH^[3], HEED^[4]; 要么以牺牲时延为代价来获得能量节约,如 PEGASIS^[5]. 由于簇头选举和簇内控制较复杂,以 LEACH 为代表的分簇路由协议控制报文开销大且分簇不均匀,使得实际运行过程中每轮数据汇聚时延较大. PEGASIS 将网络中所有节点形成一条链,每个节点只和最近的两个邻居节点通信,并采用了数据融合机制,数据量很小,获得了很高的能量效率,但由于数据沿着链逐跳传播,每轮汇聚时延很大,网络规模受限. 另外,贪婪算法导致链式拓扑中存在一些很长的链路,使得个别节点较早死亡. GSEN^[6]采用两层链结构进行数据汇聚并改进了 PEGASIS 的时延性能,但每个节点仍需要获知全网节点位置,而且不能避免贪婪成链算法产生链路的不足.

本文提出了一种能效与时延平衡的数据收集机制 (energy efficiency and delay balancing data gathering, EEDBDG), 与现有的树拓扑路由汇聚协议不同, EEDBDG 首次采用一种新颖的时变动态树模型来组织网络. 它的创新之处在于: (I) 基于节点权值或高度值进行时变路径选择, 构建了动态的最小时延树和最小距离生成树; (II) 普通节点 (而非基站) 轮流充当树根解决了“热区”问题; (III) 很好地均衡了节点能量消耗, 延长了网络寿命; (IV) 该机制是完全分布的, 节点只需获知一跳邻居的相关信息, 通信仅在邻居节点间进行, 是局部化的^①, 能有效地应对节点的退出和加入; (V) 对节点随机分布有很强的适应性, 不要求节点均匀分布. 模拟实验表明, EEDBDG 与现有协议相比在节能和省时方面具有较大优势.

1 系统模型与问题描述

1.1 网络模型

类似于 LEACH 和 GSEN, 本文的工作基于无

线传感器网络的典型应用——数据收集. 考虑一个由基站和大量随机分布的传感器节点组成的无线网络, 假定如下: (I) 基站和节点放置后不再移动, 基站位于节点监测区域外; (II) 普通节点通信半径不大于 d_{cr} , 根节点能够与基站直接通信; (III) 所有节点是同构的, 即具有相同通信和处理能力和初始能量; (IV) 节点可以根据距离来调整发射功率的大小, 还可根据接收功率获知到邻居的距离; (V) 数据汇聚时采用数据融合^[7]以减少通信量.

1.2 能耗模型

能耗模型及其参数影响到协议的能效和网络生命期. 本文采用文献[3]中 first order radio 模型来计算节点能量消耗并用于性能评估, 发射 k -bits 数据到距离 d 耗能为

$$E_{Tx}(k, d) = kE_{Elec} + k\xi_{fs}d^2 \quad (1)$$

接收耗能为

$$E_{Rx}(k) = kE_{Elec} \quad (2)$$

式中, $E_{Elec} = 50$ nJ/bit 为模块电路耗能, $\xi_{fs} = 100$ pJ/(bit · m²) 为传输放大器消耗. 另外数据融合还要消耗能量 $E_{da} = 5$ nJ/(bit · signal).

1.3 问题描述

在传感器网络中, 追求高能效的目的是延长网络生命期. 定义网络生命期为首个节点死亡时间 (以数据收集轮数衡量). 按照网络模型假设, 对于节点周期性将数据汇聚到基站的应用, 由于采用了类似链式结构^[5,6]的数据融合机制, 每个节点在每轮只发送一个数据包. 根据能耗模型, 节点在发送数据时的耗能占总耗能的大部分, 而且与发送距离有关, 所以节点发送数据时应尽量选最短的链路. 由于节点分布不均匀使得各节点能量消耗有差异, 为了均衡节点能量消耗, 选路时还应考虑节点剩余能量. 在这种情况下, 优化的对象仅限于单个节点的耗能. 通信数据量一定的情况下, 根据上述思想可以使得网络寿命最长. 另一方面, 与文献[8]类似, 定义网络的汇聚时延大小等于所有叶子节点到基站的汇聚路径中跳数最多的那条路径的跳数. 选择最近的节点转发数据能够节省能量, 但是总的传输跳数会增加. 由此可见, 低时延与高能效是相互矛盾的.

EEDBDG 算法能够在保证网络生命期的同时, 对能效和时延进行平衡. 已有的汇聚树算法通常是直接将基站作为树根进行能耗优化, 由于树根固定,

① 本文中提到的广播是指节点发送报文到其所有邻居节点, 邻居节点收到后不再转发.

即便采用多径路由算法^[8], 汇聚树的可调性仍然很小; 而且“热区”问题难以消除, 距离基站近的节点能量消耗快, 死亡早. 如图 1 所示, EEDBDG 采用的动态树模型, 每轮网络的汇聚树是变化的, 普通节点轮流充当树根, 根节点再与基站通信, 消除了“热区”问题, 而且均衡了所有节点的能耗. 对于非根节点, 灵活的选路机制可以在时延和能效上取得较好的折衷. 树根轮换以及有目标的选路使得汇聚树拓扑不断地发生变化. 考虑到节点的最大发送距离有限, 如果网络巨大时, 这一算法可用于子网或簇内的数据汇集.

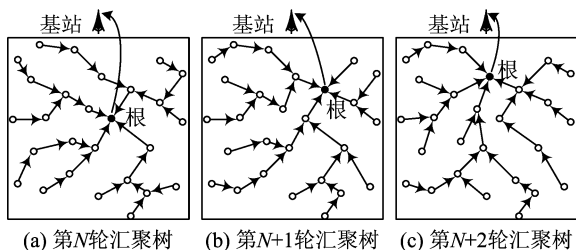


图 1 无线传感器网络时变动态树模型

Fig. 1 Dynamic tree model for WSN

2 EEDBDG 描述

EEDBDG 协议包括三个子策略: 时延最优算法 (EEDBDG-D), 能效最优算法 (EEDBDG-E) 和能效时延平衡算法 (EEDBDG-M), 它们均分为两个运行阶段: 初始建立阶段和数据收集阶段.

2.1 时延最优算法 (EEDBDG-D)

EEDBDG-D 的目标是将数据快速传回基站, 同时在节能上也做了优化.

2.1.1 初始建立阶段

在节点放置好后, 开始初始建立阶段. EEDBDG-D 初始建立阶段由四个步骤组成.

(I) 邻居发现: 所有节点用一个默认大小的功率 (通信半径 d_{cr}) 广播信息到其邻居, 使邻居节点获得该节点的 ID 和到该节点的间距, 并存入邻居表.

(II) 基站发现: 基站用一个能覆盖全网的已知功率发送“hello”信息. 这样节点就可以估算出到基站的距离, 便于其作为根节点时直接与基站通信.

(III) 初始树建立: 从 ID 为 1 的节点开始向周围节点发起一种类似的受控泛洪. 每个节点都有一

高度值 H , 初始时均为一很大的整数. 将节点 1 的 H 值设为 0. 节点 1 广播的初始树建立报文中含有其 H 值 0. 邻居节点收到后将自己的 H 值设为 1, 并修改建立报文的 H 为 1, 向它的邻居广播, 依此类推. 每个节点只在第一次收到时发送一次建立报文, 但会监听邻居节点的 H 值改变并相应调整自己的邻居表. 由于信道是双向的, 这样按发送和接收建立报文顺序和 H 值高低就建立起以节点 1 为根的一棵树.

(IV) 树拓扑调整: 步骤 (III) 中的树拓扑在时延上已经是最好的, 但能耗还需要优化以节约能量. 算法如下: 节点在 H 值最低的邻居节点中选择距离自己最近的邻居作为父节点.

2.1.2 数据收集阶段

数据收集阶段占据了网络生命期的绝大部分时间. 数据周期性地发往根节点, 再到基站. 每轮树拓扑都在进行调整.

数据汇集由叶子节点开始, 叶子节点选择 H 值最低的邻居节点中距离自己最近的邻居为父节点, 并将采集到的数据处理打包后发送到其父节点. 父节点收到所有子节点的数据后, 进行数据融合压缩, 然后选择自己的父节点并发送, 依此类推, 直到根节点收到所有子节点的数据, 同样融合后发送给基站. 根节点发送完数据后, 选择邻居中能量最大的为下一轮的树根^②, 并通知该节点, 新根节点将自己的 H 值改为原根节点的 H 值减 1. 这样根节点的高度值始终是全网最低的, 保证了路由的有效性且避免了环路.

在 EEDBDG 协议中, 信息交互是很重要的, 节点计算均根据自己的邻居表内容, 所以邻居表实时更新很关键. EEDBDG 采用两种方式进行邻居信息交互: (I) 信息捎带与旁听: 在发送数据时捎带自己的 H 值和剩余能量信息, 邻居节点可以接收或旁听到; (II) 周期信息广播: 可以在每轮数据发送完毕后广播, 由于相邻两轮节点信息变化较小, 也可以间隔一定轮次广播一次. 周期信息广播还起到向邻居表示自己存在的作用. 节点收到更新报文后, 首先更新自己的邻居表, 如果父节点的 H 值变化, 要将自己的 H 值调整为比父节点的多 1. 由于根节点的 H 值不断减小, 随着运行轮数增加带动全网节点的

② 在邻居节点中选新根节点代价低. 由于相邻两轮的拓扑变化较小, 可以继承上一轮的一些优链路或部分路由拓扑. 如果根节点位置变化太大, 节点不知道汇聚路由, 必须重构汇聚树.

H 值不断减小。

2.2 能效最优算法 (EEDBDG-E)

EEDBDG-E 目标是追求网络生命期最大化,同时在时延上比 PEGASIS 和 GSEN 有很大提高。

2.2.1 初始建立阶段

EEDBDG-E 初始建立阶段也由四个步骤组成。其中邻居发现与基站发现与 EEDBDG-D 相同,初始树建立唯一不同的是节点收到初始树建立报文后,将其中的 H 值增加 4(不是增加 1)设为自己的 H 值,并继续广播(如为第一次收到)。增加 4 的目的是为了进一步的拓扑调整,以生成最小距离生成树。

EEDBDG-E 树拓扑调整步骤与 EEDBDG-D 完全不同,它要调整为最小距离生成树以节能。为了降低复杂度,本文提出了一种近似最小生成树算法 (PMSTA),它仅利用邻居表中的信息,报文复杂度很低。PMSTA 算法是一种搜索标记算法,有两种方式:(I)被动标记:由初始化树根 1 号节点发起,1 号节点寻找离自己最近的邻居 k 并发送标记信息, k 收到后将自己的 H 值改为 1 号节点的值加 1,并确立该链路。 k 节点被标记后又可以发送标记信息到其最近的子节点,依此类推;(II)主动标记:当节点收到或旁听到邻居节点的 H 值变化时,重新比较邻居距离和 H 值,选 H 值低的且离自己最近的邻居为父节点,更改自己的 H 值。一定时间以后,标记过程完成,除个别链路外,每个节点均选择了最近的发送链路,这样一棵近似的的最小生成树建立好了。

图 2 是 PMSTA 算法中两种标记方式实例。在图 2(b)中,节点 b 由根节点 a 被动标记后, H 值更新为 $0+1=1$,然后继续标记自己的最近子节点 c , c 调整 H 值为 $1+1=2$; b, c 均为被动标记。在图 2(c)中节点 d 得知 c 的 H 值变化,改选 c 为父节点,从而完成主动标记。

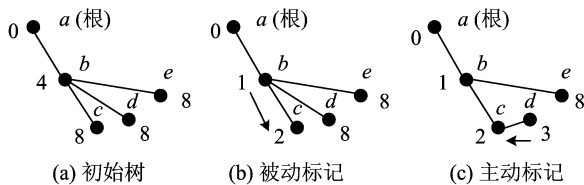


图 2 PMSTA 算法主动标记与被动标记

Fig. 2 Active labeling and passive labeling in PMSTA

由于最小距离生成树是唯一的(假定所有链路均不等长),基于最小生成树的动态拓扑调整比较容

易。而且由于耗能主要与发射距离有关(见式(1)),故最小距离生成树拓扑最为节能。

2.2.2 数据收集阶段

与 EEDBDG-D 类似,数据由叶子节点向根节点汇聚并进行根节点轮换,但 EEDBDG-E 父节点的选择依据式 $w_{ij}(\tau) = (2k_{ij}E_{\text{elec}} + k_{ij}\xi_{fs}d_{ij}^2)/E_j(\tau)$, $w_{ij}(\tau)$ 为 i 节点到 j 节点的链路权重,它与收发距离 d_{ij} 和接收节点当前时刻 τ 的剩余能量 $E_j(\tau)$ 有关。在链路距离最近的基础上,考虑到节点剩余能量,防止某些节点因通信量繁重而过早死亡。当节点收到所有子节点的数据后,进行数据融合,压缩成定长数据包。然后利用邻居表信息,计算 H 值低于自己的邻居对应的链路权重,选取最小权重链路的邻居为父节点并发送数据,同时根据父节点的 H 值改变自己的 H 值(保证比父节点 H 值低 1)。

2.3 能效时延平衡算法 (EEDBDG-M)

EEDBDG-M 是一种能效时延折衷算法,它的拓扑控制与 EEDBDG-E 相同。数据建立阶段和 EEDBDG-E 一样,创建最小距离生成树。

在 EEDBDG-E 中,数据汇聚路径与拓扑控制是一致的,但 EEDBDG-M 中的数据汇聚路径采用“虚假路径”,也即数据并不是发送给自己的父节点,可能是祖父节点或者其他比自己 H 值低的节点。EEDBDG-M 的选路策略为:节点首先将比自己高度低的邻居节点按高度值排序;然后选取高度值序列的中位数对应的邻居节点为数据接收节点。此外,节点还要在信息更新的基础上进行拓扑调整,包括根节点的轮换过程和基于 H 值和选路权重的父节点的选择过程。

图 3 示意了本文提出的三种选路策略。圆圈为节点 a 的通信范围,圈内节点均为 a 的邻居节点,可与 a 直接通信。节点旁边的数字为节点的高度值。图中虚线为网络拓扑,实线为 a 节点的当前数据发送路径。

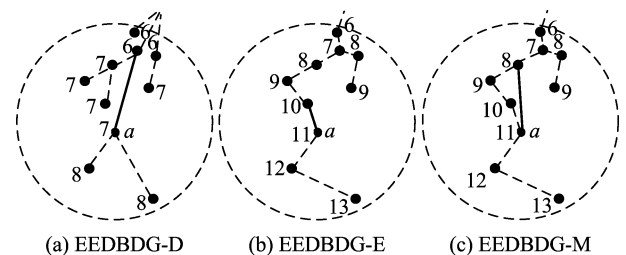


图 3 EEDBDG 三种选路算法

Fig. 3 Three routing selection ways in EEDBDG

在网络生命末期, EEDBDG 采用以下措施来维护网络. 当有节点死亡时, 它的邻居节点会在一定时间后得知(无周期性广播), 然后将其从邻居表中删除. 当节点的所有邻居节点均死亡时, 节点将增大发射功率寻找邻居或直接与基站通信. 由于节点间的通信是局部的, EEDBDG 能有效地应对节点的加入和失效. 加入节点只要构建自己的邻居表即可运行 EEDBDG 算法, 而失效节点会在一定时间后被邻居从各自的邻居表中删除.

3 协议分析

在报文复杂度上, EEDBDG 报文主要来源是邻居节点间的广播信息交互. 在建立阶段, 每个节点两次广播, 加上标记报文, 需要 $3N$ 条报文. 在数据收集阶段, 信息交互主要由捎带方式完成. 报文来源于节点周期性的广播和树根传递, 如果每轮广播一次, 那么每轮需要 $N+1$ 条报文, 所以 EEDBDG 报文复杂度为 $O(N)$. 由此可见, EEDBDG 的复杂度很低, 实现简单.

下面定性分析基站位置、节点数量、区域大小和节点通信半径的改变对 EEDBDG 算法性能的影响. 进一步的理论分析是下一步的工作.

(I) 通信半径(d_{cr}): 节点密度一定时, 通信半径决定了节点邻居数目. 对于 EEDBDG-E 算法, 由于节点根据权重函数最小的选路, 通信半径的变化对它的能效和时延影响很小. 对于 EEDBDG-D 和 EEDBDG-M 算法, 通信半径增大使得汇聚时延减小但能效降低, 网络寿命降低, 反之亦然.

(II) 基站位置: 基站位置主要影响根节点到基站通信时的能耗. 由于基站位于节点覆盖区域之外, 如果基站相对区域边界较远, 使得每轮的根节点消耗能量较多, 即使采用轮换根节点的方式, 仍然会降低网络生命期. 不同的基站位置对汇聚时延没有影响.

(III) 节点数量(N): 固定区域面积时, 节点数量影响节点密度. 当节点密度增加或减少时, 对于 EEDBDG-D 算法, 由于节点通信半径没变, 这种固定对其时延和能耗没有影响; 对于另两种子算法, 密度增大, 能效更高但时延更大, 反之亦然.

(IV) 区域规模: 当区域大小变化时, 一方面它影响到节点密度, 另一方面使得基站到汇聚树根节点的平均距离变化. 对于 EEDBDG-D 算法, 区域面积对节点能效影响很小, 但数据汇聚时延与面积成

正比. 对于 EEDBDG-E 和 EEDBDG-M 算法, 区域面积增大会使得节点能耗增大, 而对汇聚时延的影响较复杂, 有增大也有减少的因素. 我们将通过仿真来研究.

4 实验模拟与结果分析

4.1 实验方法及参数

用 C++ 编写模拟程序对 EEDBDG 协议进行性能分析和评估. EEDBDG 协议属于网络层协议, 为简单起见, 假定 MAC 层协议是理想的并忽略信道差错. 为了证明本文提出的协议的优势, 我们将 EEDBDG 与最新的数据收集协议 GSEN 进行比较, GSEN 是一种高能效低时延的算法, 采用两层链结构进行数据汇聚从而改进了 PEGASIS 的时延性能. 文献[6]已经验证了 GSEN 算法能量效率优于 PEGASIS 和 LEACH, 同时 GSEN 的平均数据汇聚时延仅为 PEGASIS 的 40%.

模拟程序通过进行 200 次对随机节点分布场景实验得到平均抽样结果. 仿真程序中每个节点均有位置、能量和邻居表等参数属性. 每轮开始首先根据上一轮记录的信息更新队列和对各节点参数进行更新, 然后各节点根据自身参数进行算法计算并产生新的信息更新队列. 模拟程序统计了节点每轮的能量消耗情况并计算了数据汇聚时延, 最后记录了网络生命期.

实验中所用的参数如表 1 所示, 其中能量消耗模型相关的参数与文献[3]相同. 数据和消息长度由协议实现时的真实情况估计得到. 节点初始能量 E_0 均为 0.5 J, 当节点剩余能量低于 0.002 J 时认为节点死亡.

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数	取值	参数	取值
ξ_{fs}	100 pJ/(bit · m ²)	E_{da}	5 nJ/(bit · signal)
E_{Elec}	50 nJ/bit	节点数 N	50, 75, 100, 125, 175
数据长度	4 000 bits	消息长度	80 bits
区域规模	(50×50)(75×75)(100×100)(125×125)(150×150)		
基站位置	(50, 100~200)(25, 100)(38, 125)(68, 175)(75, 200)		
通信半径(d_{cr})	20m, 25m, 30m, 35m, 40m		

4.2 实验结果分析

本文将每种协议通过对基站位于(50, 150), 100 个节点随机分布于(100 m×100 m)区域的场景进行多次仿真(设定 EEDBDG 协议通信半径为 20

m), 统计得到平均的网络生命期和汇聚时延如图 4 和图 5 所示.

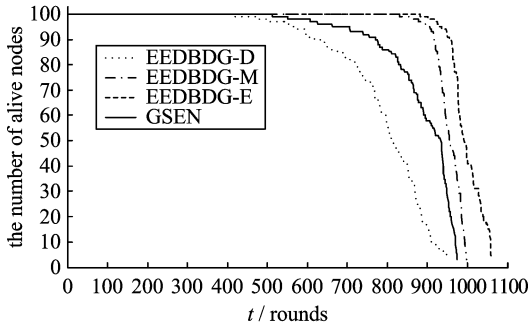


图 4 不同协议下的网络生命期

Fig. 4 Network lifetime of different protocols

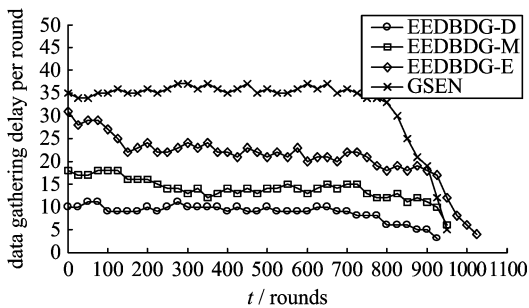


图 5 不同协议数据汇聚时延

Fig. 5 Data gathering delay of different protocols

图 4 描述了四种协议存活节点数目与时间的关系. 由图可以看出, EEDBDG-D 节点最早死亡, 接下来是 GSEN, 而 EEDBDG-M 和 EEDBDG-E 节点很晚才开始死亡. 它们的网络生命期依次为: 409 轮, 513 轮, 831 轮, 883 轮. EEDBDG-M 和 EEDBDG-E 的平均网络生命期比 GSEN 分别提高了 62% 和 72%. 并且这两种算法节点死亡时间集中在后 200 轮, GSEN 节点死亡持续了 500 轮时间. 这是因为链式协议采用的贪婪算法存在缺陷. 这表明

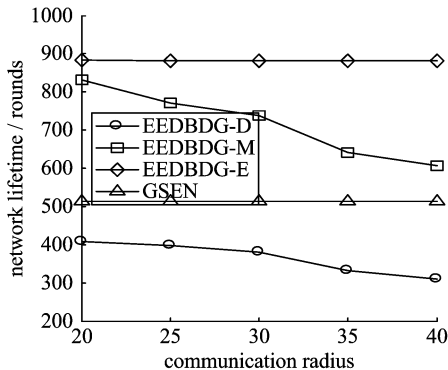


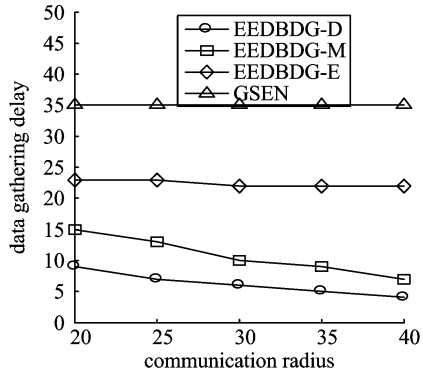
图 6 通信半径与协议性能 (N = 100, 100 × 100, BS = (50, 150))

Fig. 6 Performance of protocols as communication radius increased

EEDBDG 更好地均衡了所有节点的能量消耗. 图 5 描述了四种协议下数据汇聚时延的变化情况. GSEN 算法每 25 轮重新分组, 25 轮内时延不变, 便于比较, 本文对 EEDBDG 每 25 轮进行对应的时延抽样平均. 易见 EEDBDG-D 时延最低, 仅为 GSEN 的 74%, 它们的平均时延值依次为: 9, 15, 23, 35. EEDBDG 协议中时延最差的 EEDBDG-E 的平均时延也仅为 GSEN 的 66%. EEDBDG 三种算法的性能关系与图 3 中选路算法的路径长度关系一致, 能耗与通信距离平方有关, EEDBDG-E 平均通信距离最短, 最为节能; 而通信距离长使得根的跳数减少, 故 EEDBDG-D 算法时延最小. EEDBDG 协议在时延上的优势主要因为它更适应节点随机分布的特性, 即节点间距离的差异较大, 动态树算法的时延只取决于树的深度. 而链式算法 GSEN 更适合于节点均匀分布的情况, 否则它无法降低最大组的成员数目导致时延较高.

实验中还通过改变仿真参数进行模拟来研究参数对协议性能的影响. 图 6 描述了基站位于 (50, 150), 100 个节点随机分布于 (100 m × 100 m) 区域的场景下节点通信半径与协议能效和时延性能的关系. GSEN 算法的通信半径是固定的, 要求能覆盖全网. 由图 6 可见, 通信半径变化对于 EEDBDG-E 和 GSEN 性能没有影响, 与上一节的分析一致. 对 EEDBDG-M/D 协议, 通信半径增大降低了网络寿命但减小了时延.

图 7 描述了 100 个节点 (通信半径为 20 m) 随机分布于 (100 m × 100 m) 区域的场景下基站位置对协议性能的影响. 图中基站位置从 (50, 100) 到 (50, 200) 变化时, 四种协议的数据汇聚时延没有变化但网络寿命均递减, EEDBDG-D 协议下降最快, 但 EEDBDG-M/E 算法性能始终好于 GSEN. 能耗



与距离平方成正比,基站距离越远,根节点消耗能量越多.

图 8 描述了不同数目节点(通信半径为 30 m)随机分布于(100 m×100 m)区域的场景下各协议性能的变化,基站位于(50,150). 由图 8 可以看出,节点数目变化对 EEDBDG-D 协议能效和时延性能

没有影响;其他三种协议当节点数目增大时,均表现为网络寿命延长和汇聚时延增大,这是由于节点密度增大,节点间距减小. EEDBDG-M/E 算法性能始终好于 GSEN.

图 9 描述了 100 个节点(通信半径为 25 m),基站保持位于距离边界 50 m 处时,网络区域大小变

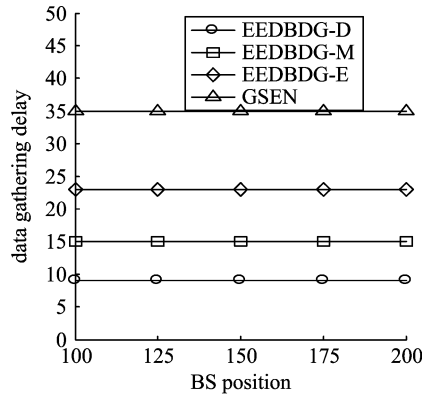
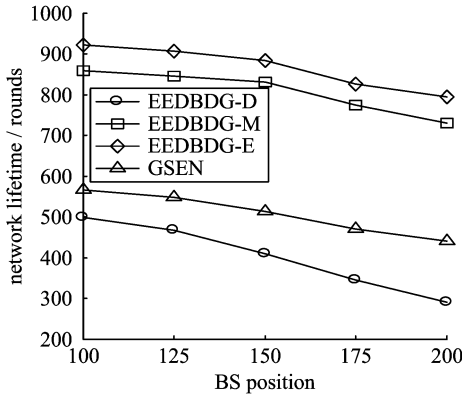


图 7 基站位置与协议性能 (N = 100, 100 × 100, d_{cr} = 20 m)

Fig. 7 Performance of different protocols as BS travels farther

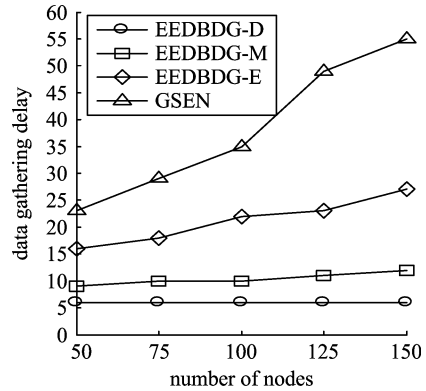
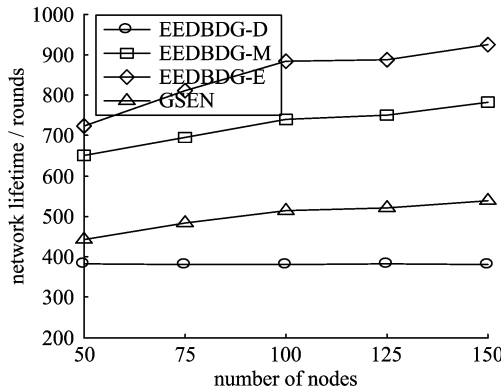


图 8 节点数量与协议性能 (100 × 100, BS = (50, 150), d_{cr} = 30 m)

Fig. 8 Performance of protocols as number of nodes increased

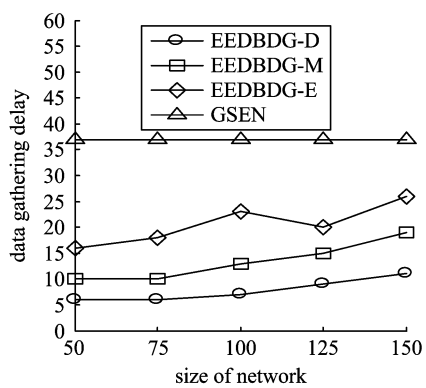
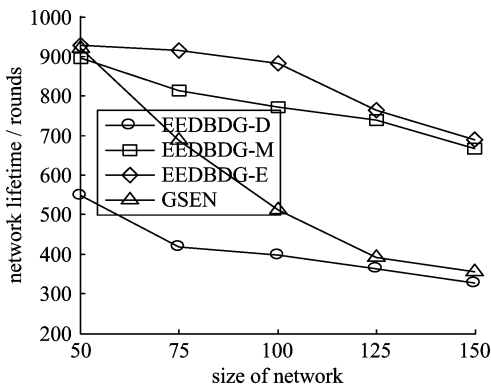


图 9 区域大小与协议性能 (N = 100, d_{cr} = 25 m, BS 离边界 50 m)

Fig. 9 Performance of protocols as the network size increased

化对协议性能的影响. 随着区域增大, 四种协议的网络生命期均减小, 其中 GSEN 减小幅度最大, 与 EEDBDG-M/E 的差距也增大. 值得注意的是, 当区域为 $50\text{ m} \times 50\text{ m}$ 时, GSEN 和 EEDBDG-M/E 协议的网络生命期相差很小, 因为此时节点密度非常高, 节点间距很小, EEDBDG 算法在链路长度上与 GSEN 相比优势很小. 对于 EEDBDG-M/E 协议, 它们的网络寿命在区域为 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 时相差最大为 111 轮, 而当区域更小或更大时, 两种算法差异均减小. 区域更小时差异减小是由于节点间距很小故链路长度差异小使得能耗差异小, 区域更大时差异减小是由于节点密度下降, 在固定通信范围内, 节点邻居很少, 选路算法中的备选接收节点数量少. 在数据汇聚时延上, 虽然 GSEN 没变, EEDBDG 的时延始终低于它. EEDBDG-M/D 协议均随区域变大而时延增大, 但 EEDBDG-E 协议的时延变化不具备单调性, 区域为 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 和 $125\text{ m} \times 125\text{ m}$ 时, 时延分别达到一个极大值和极小值. 在上一节我们分析得到通信半径和数目固定时区域增大对 EEDBDG-E 协议时延有正反两方面影响, 一方面使得节点间距增大, 距离根节点变远, 时延增大; 另一方面节点邻居数目下降, 跳数会减少, 使得时延降低.

总结实验结果, 无论是通信半径、基站位置、节点密度还是区域大小发生变化, EEDBDG 算法在节能与省时两方面的性能均好于 GSEN.

5 结论

本文提出了一种能效与时延平衡的数据收集协议 EEDBDG, 它由三个子策略组成, 分别实现了时延最优(EEDBDG-D)、能效最优(EEDBDG-E)和能效时延平衡(EEDBDG-M). 实验表明, 在不同参数和场景下, EEDBDG-D 算法均保持了最低时延, 平均时延比 GSEN 降低了 70%, 平均网络寿命仅下降了 20%. 而 EEDBDG-M 和 EEDBDG-E 协议在性能上明显优于 GSEN, 时延性能和能效性能提升均高于 60%.

本文主要贡献在于: (I) 用一种仅基于局域信息的分布式算法简单快速地组织全网节点进行数据汇聚, 对节点非均匀随机分布有很好的适应性; (II) 提出了动态最小能耗树和最小时延树来辅助路由, 实现了能效即网络寿命和汇聚时延单方面最优化以

及它们的折衷; (III) 动态树算法很好地均衡了节点能量消耗, 同时消除了“热区”问题. EEDBDG 协议为无线传感器网络的在不同环境下应用提供了三种可选方案, 在实际应用时可以灵活选择.

参考文献(References)

- [1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless sensor networks: a survey [J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393-422.
- [2] LIN Zhi-ting, QU Yu-gui, ZHAI Yu-jia, et al. Algorithm for the placement of nodes for effective coverage [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2005, 35(3): 411-416. 蔺智挺, 屈玉贵, 翟羽佳, 等. 一种高效覆盖的节点放置算法 [J]. 中国科学技术大学学报, 2005, 35(3): 411-416.
- [3] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks [C]//Proceedings of the 33rd Hawaii Annual International Conference on System Sciences. Hawaii: IEEE Computer Society, 2000, 8: 3 005-3 014.
- [4] Younis O, Fahmy S. HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(4): 366-379.
- [5] Lindsey S, Raghavendra C. PEGASIS: power-efficient gathering in sensor information systems [C]//Proceedings of the IEEE Aerospace Conference. Montana: IEEE Aerospace and Electronic Systems Society, 2002, 3: 3 125-3 130.
- [6] Tabassum N, Ahsanul Haque A K M, Urano Y. GSEN: an efficient energy consumption routing scheme for wireless sensor network [C]//International Conference on Networking International Conference on Systems and International Conference on Mobile Communications and Learning Technologies. IEEE Computer Society, 2006: 117-122.
- [7] Hall D L, Llinas J. An introduction to multisensor data fusion [J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(1): 6-23.
- [8] HUANG Liu-sheng, LI Hong, XU Hong-li, et al. A load balancing multi-path routing in wireless sensor networks [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2006, 36(8): 887-892. 黄刘生, 李虹, 徐宏力, 等. 无线传感器网络中基于负载均衡的多路路由 [J]. 中国科学技术大学学报, 2006, 36(8): 887-892.