

能量有效和延迟敏感的无线传感器网络数据收集协议^①

罗振瑛 郑 瑾 (中南大学 信息科学与工程学院 湖南 长沙 410083)

摘要: 利用移动 Sink 进行数据收集是无线传感器网络数据收集的一个趋势。本文提出一种能量有效、延迟敏感的移动数据收集协议(Energy-efficient and Delay-Sensitive Data Gathering Protocol for Wireless Sensor Networks,简称 EEDS)。EEDS 中,移动 Sink 在网络中穿行,从代理节点收集传感器节点监测到的数据。为了减少数据收集的延迟,采用类 TSP(Traveling Salesman Problem)的解决方法,确保移动 Sink 在各个代理节点中收集数据时,始终选择一条最短路径在网络中行走。模拟仿真表明,提出的数据收集协议在延长网络生命周期以及减少数据收集延迟方面都有显著的优势。

关键词: 无线传感器网络; 数据收集; 移动汇聚节点; 代理节点; 最短路径; TSP

Energy-Efficient and Delay-Sensitive Data Gathering Protocol for Wireless Sensor Networks

LUO Zhen-Ying, ZHENG Jin (School of Information Science & Engineering of Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Using mobile sink to gather data is one of the comprehensive trends in wireless sensor networks. This paper proposes an energy-efficient and delay-sensitive data gathering protocol (EEDS) for wireless sensor networks. In EEDS, The mobile sink traverses in the entire network to upload the sensed data from agent nodes. In order to reduce the length of path which mobile sink traverses the network, the solution of TSP-like is proposed, which ensures mobile sink always choose the shortest path to walk through the network. Simulation results have demonstrated that the proposed data collection strategy has a significant advantage in extending the network life time and reducing data transmission delays.

Keywords: wireless sensor networks; data gathering; mobile sink; agent node; shortest path; TSP

无线传感器网络是以数据为中心的网络。其主要功能是对监测环境的数据进行采集和管理。由于传感器节点上的能量资源非常有限,如何提高能量的使用效率从而延长网络生命期成为主要研究问题^[1]。传统的数据收集模式都假设基站静止不动,节点通过多跳方式向基站传输数据,这样,基站周围的节点由于转发负载大而成为网络性能的瓶颈,这些节点将会快速死亡,从而缩短网络寿命。采用移动汇聚节点(Mobile Sink,以下简称 MS)收集数据,是无线传感器网络数

据收集的一个重要趋势。这种数据收集方法在均衡网络能量消耗,剔除网络热点问题方面起到显著的作用。

1 相关工作

TTDD 协议^[2]是一个层次路由协议,该协议让每个捕捉到事件的传感器节点在网络中构建一个网格结构,即把网络划分为固定大小的单元,然后把数据的描述信息(描述信息可以看做是事件的索引,并不是真正的数据)泛洪到每个网格中,在泛洪的过程中,每个

① 基金项目:湖南省杰出青年科学基金资助(07JJ1010);教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0686)。

收稿时间:2010-03-24;收到修改稿时间:2010-04-26

收到此信息的节点记录下第一个传给它信息的邻居节点信息。基站需要数据的时候只需要把查询在自己所在的小网格中广播就能查询到相关的数据。当基站移出一个网格后，基站只需要重新在新的网格中广播查询信息即可。这样就减轻了基站对整个网络的查询泛洪。该协议中每个数据源都要维护一个遍布于整个网络的网格结构，构造和维护代价很大，当数据源数量增多时，情况更加严重。

在较早提出的利用 MS 进行数据收集的 Data Mules^[3]模式中，MS 在网络中随机移动，并在传感器节点和数据收集点之间往返传送数据。但是，由于骡子的运动是随机的，从而导致延时无法估计。

MS 受控移动则根据网络情况确定 MS 的移动路线。MADG^[4]模式考虑总能量消耗和节点负载均衡两方面约束，找出 MS 最优的移动区域(数据缓冲区)，MS 周期性地在此缓冲区内移动进行数据收集。主要需要解决的是如何调度 MS 的移动路线的问题，该问题是 NP 难的。虽然利用启发式算法，求出 MS 的次优移动路线，但收集网络信息的代价太高，尤其是网络数据流量动态变化的情形。

文献^[5]针对移动汇聚节点的移动方式，设计两种移动模式，一种是可预测的模式，另一种是可控制的模式。在这些策略中，固定^[6]的传感器节点只有在移动汇聚节点来到他们周围足够近的情况下，才把他们的数据发给汇聚节点。这种策略的不足之处是，数据收集的延迟太大，同时可能会因为传感器节点存储空间不足导致数据丢失。

MDCI^[7]协议中，通过建立以 MS 为簇头的簇来进行数据收集。MS 在网络中穿行，周期性地广播 beacon 消息，传感器节点收到 beacon 消息后，若符合条件，则加入该簇，并把数据传输给簇头 MS。MS 在协议中有两种移动模式，其中采取 BRMM(Bounded Random Mobility Model)^[8]的移动模式时，网络性能要优于 MS 的随机移动模式。MDC 能够显著减少网络的拥塞，但由于 MS 在网络内随机移动，数据收集延迟无法估计。

上面的几种数据收集协议要么存在能量消耗大，要么存在数据收集延迟大的问题。由此，本文提出一种能够在传感器节点能量消耗和数据收集延迟两方面有较好均衡，适合于大规模网络的移动数据收集策略。移动汇聚节点只在代理节点间穿行，从代理节点收集

传感器节点监测到的数据。为了缩短 MS 行走的路径，引入类 TSP 的解决方法，即确保移动汇聚节点始终选择一条最短路径移动，收集网络数据。模拟实验表明，提出的数据收集策略在延长网络生命周期减少数据收集延迟方面都有显著的优势。

文章的剩下部分安排如下：第 2 部分是 EEDS 协议的介绍，阐述网格头节点的选举、代理节点的部署以及移动汇聚节点的数据收集协议，第 3 部分是模拟实验和结果分析，最后是对全文的总结。

2 能量有效、延迟敏感的数据收集协议(EEDS)

2.1 虚拟网格的形成

在整个无线传感器网络区域中，将其分成大小相等的逻辑正方形网格，大小为 $d \times d$ 。每个网格 ID 号用传统的 2 维坐标 $[X,Y]$ 来表示。如图 1 所示。在第一行中，从左到右，各个网格的 ID 号依次是 $[0,0],[1,0],[2,0],[3,0] \dots [n,0]$ 。

同样地，第二行的网格 ID 号依次是 $[0,1],[1,1],[2,1],[3,1] \dots [n,1]$ 。由此，容易得知第 n 行的网格 ID 号。

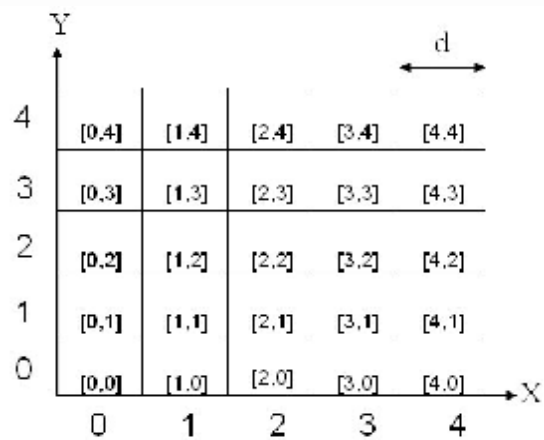


图 1 网格索引

网络内的某个传感器节点可以通过公式(1)来确定自己属于哪个网格。

$$X = \lfloor x/d \rfloor, Y = \lfloor y/d \rfloor \tag{1}$$

公式(1)中， x 和 y 分别是传感器节点实际的横坐标和纵坐标， d 是网格的边长，符号 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示小于 k 的最大整数。

网格大小可以根据网络节点的部署而改变，当网络节点密集分布的时候，则网格边长可以设置小一些；

当网络节点稀疏分布时，网格边长则相应地设置大一些。

图 2 显示的是一个物理实际网络被划分为逻辑网格的情况。其中，星号表示网格头节点，小圆圈表示传感器节点。

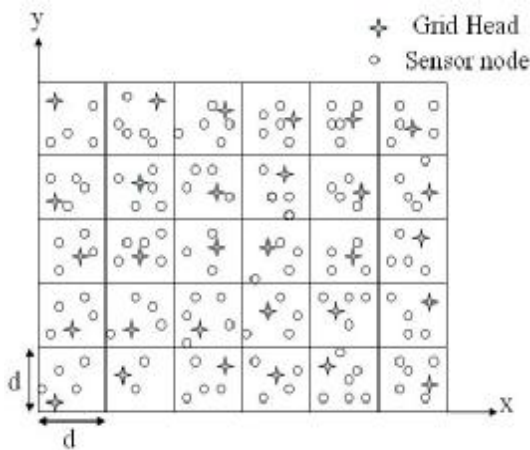


图 2 一个物理实际网络被划分为逻辑网格

2.2 网格头节点(Grid Head, 以下简称 GH)的选取

为了实现能量均衡，每个网格内选择一个剩余能量最大的节点来充当 GH，负责收集网格内的数据，并把数据通过其它网格头节点向代理节点转发，减少其它节点的数据转发。

GH 的选取规则如下：

由于传感器节点的初始能量相同，在第一轮时，随机选取一个传感器节点作为 GH，同时，GH 在网格内广播其 ID 号，网格内的传感器节点把数据传给 GH。此后的每一轮，通过比较传感器节点剩余能量大小，选择剩余能量最大的传感器节点作为 GH。

2.3 代理节点的部署

由于需要监测的环境一般比较恶劣，并不是每个地点都能轻易到达。因此，我们可以选择某些容易让 MS 靠近的地点来部署一些特殊的节点，作为网络的代理节点。这些代理节点的存储能力、计算能力和能量都优于普通的传感器节点。代理节点的数量可视具体的网络环境而定。

部署代理节点的优势：

(1) 如果 MS 的移动速度太慢，会造成数据收集的延迟和传感器存储空间不足导致的数据丢失。

引入代理节点，普通的传感器节点可以随时把感知到的数据发给代理节点，而无需等待 MS 的到来，这样可以解决以往数据收集协议中传感器节点因为存储空间不足而造成的数据丢失问题。

(2) 由于 MS 只与代理节点通信，网络的拓扑变化对数据收集的影响较小。

2.4 能量有效、延迟敏感的数据收集协议(EEDS)

2.4.1 主要思想

无线传感器网络是以数据为中心的网络，如何提高能量的高效使用从而延长网络生命周期成为主要的研究热点而尽可能快地对数据进行收集，从而对监测环境进行理解和反应是大多数无线传感器网络应用的基本需求。

EEDS 通过选择剩余能量最大的节点充当 GH 收集和转发传感器节点的数据，以此达到能量均衡。MS 在代理节点中选择一条最短路径进行移动收集数据，使数据收集的延迟减小。

2.4.2 TSP 问题简述

TSP 问题，即旅行商问题 (Traveling Salesman Problem) 是数学领域中著名问题之一。假设有一个旅行商人要拜访 n 个城市，其中每两个城市之间都有道路相连，城市 i 和城市 j 之间的距离为 d_{ij} 。旅行商人从某城市出发周游所有城市，每个城市经过一次且仅一次，最后回到出发地，求总行程最短的周游路线。TSP 求解过程中最基本的运算是：一、求和；二、比较大小。其中取值最小的为最优解。

具体的 TSP 求解算法可以参考文献[9]。

2.4.3 数据收集协议 EEDS

基于 TSP 问题的思考，结合本文数据收集的设计思想，可以把代理节点看作是 TSP 问题中的城市，把移动汇聚节点(MS)看成是 TSP 问题中周游各城市的商人。如此，可以把数据收集问题转化为 TSP 问题来解决。

各网格内的传感器节点通过一跳把数据发给自己所属的 GH，各个 GH 按轮收集传感器节点监测的数据，并将数据转发给距离最近的代理节点。MS 从基站出发，采取类 TSP 的路径行走方法，在代理节点中收集数据，最后返回基站。

数据收集的算法描述如图 3 所示。

```

1. 网络初始生成;
2. 把网络划分成大小相等的M个正方形网格;
3. 选取GH:
   if (当R=1时) /* R为数据传输的轮数 */
   随机选择节点作为GH, 在网格内广播其ID号;
   else
   选择剩余能量最大的节点作为新一轮的GH;
4. 网格内的传感器节点传输数据到GH:
   if(传输的数据为最后一帧)
   then /* 执行以下4个操作: */
   剩余能量信息和数据一起传输到GH;
   比较各节点的剩余能量;
   R=R+1;
   转到3; /* 进入新一轮的数据传输, 重新选择GH */
   else /* 如果不是传输的最后一帧, 则执行以下两个操作 */
   只传数据到GH;
   转到4。
5. 每轮结束后, GH把数据传给代理节点。
6. MS从基站出发, 到各个代理节点收集数据, 然后再返回基站。
    
```

图 3 数据收集协议 EEDS

其中 MS 的移动路径选择利用类 TSP 的求解算法。

3 模拟实验

3.1 网络模型

本文假设 n 个传感器节点随机均匀分布在一个正方形区域 S 内, 并且该传感器网络具有如下性质:

- (1) 普通传感器节点部署后不再移动。
- (2) 基站部署在区域 S 以外的一个固定位置, 并且基站是唯一的。
- (3) 部署后网络不需要人为维护。
- (4) 网络中除了移动汇聚节点和代理节点外, 所有节点具有相似的能力(处理/通信)。
- (5) 节点装备有 GPS, 可以知道其自身的具体位置。

置。

3.2 模拟参数

本文使用的模拟工具是 OMNET++, 代理节点的数量为 30 个, MS 的移动速度为 20m/s。

模拟参数表如表 1 所示。

表 1 模拟参数表

参数名	数值
模拟区域大小	2000m×2000m
MS 数	1
代理节点数	30
传感器节点数	500-1000
MS 的移动速度	20m/s
传感器节点的初始能量	10J
节点发送数据的能量消耗	70 NJ/bit
数据包大小	250 bits

3.3 模拟结果分析

模拟实验从数据收集延迟和网络能耗两方面对 EEDS 协议和 MDC 协议的网络性能进行了分析比较。

(1) 数据收集延迟

传感器网络能量资源受限, 因此, 如何减少能量消耗以延长网络生命周期是最受关注的问题。同时, 保持能量的有效性也带来了额外的延迟。因此必须寻求能量消耗和数据收集延迟这两者之间的一个折衷点。

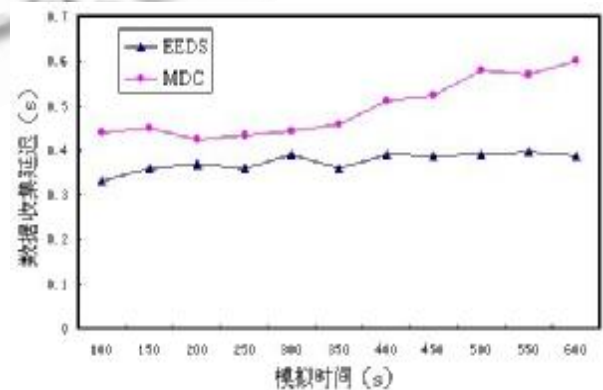


图 4 两种协议下的数据收集延迟比较

图 4 是在网络规模、节点初始能量等参数都相同的情况下, EEDS 和 MDC 数据收集平均延迟的比较。

从图 4 可以看到,在相同的模拟时间内,EEDS 的数据收集平均延迟明显小于 MDC 协议。

这是因为在 EEDS 协议中,我们选择了某些容易让 MS 靠近的地点来部署一些特殊的节点,作为网络的代理节点。MS 遵循了类 TSP 的行走方式,始终选择一条最短路径在代理节点中收集数据,由此,数据收集延迟得到降低。而 MDC 的 MS 会随着时间的推移,在网络中行走的路径具有随机性,这将导致数据收集延迟增加。

(2) 器节点数目与网络生命期的关系

图 5 显示了在不同网络规模的情况下,EEDS 和 MDC 网络生命期的对比情况。可以看出,EEDS 的网络生命期比 MDC 的要高很多。

这是由于,EEDS 协议将网络划分为大小相同的网格,各个网格在每一轮中选举出能量最大的传感器节点作为 GH, GH 把收集到的数据转发到最近的代理节点。这样很好地做到了能量均衡,延长了网络的生命期。

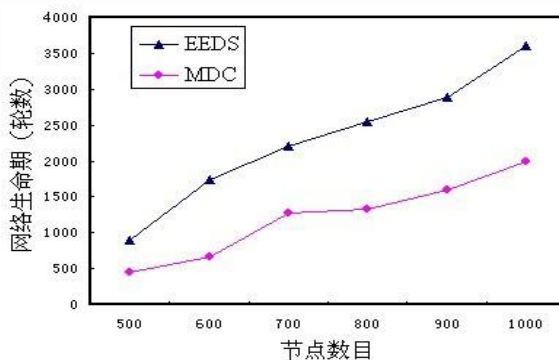


图 5 传感器节点数目与网络生命期的关系

4 结束语

本文从延长无线传感器网络的生命期、减少网络数据收集的延迟这两方面出发,提出了一种基于网格、布设代理节点的移动数据收集协议。在此协议中,选取能量大的节点作为每轮的网格头节点。同时,为了减少延迟,利用 TSP 算法,求解 MS 的移动路径降低数据收集

延迟。实验结果表明,EEDS 比 MDC 有更好的性能。今后的工作重点是进行多个 Sink 节点的研究,以更好地实现网络能量均衡,更快地收集网络数据。

参考文献

- 1 Uojun Wang, Tian Wang, Weijia Jia, Minyi Guo, Hsiao-Hwa Chen, Mohsen Guizani. Local Update-Based Routing Protocol in Wireless Sensor Networks with Mobile Sinks. ICC 2007.
- 2 Ye F, Luo H, Cheng J, Lu S, Zhang L. A two-tier data dissemination model for large-scale wireless sensor networks. Proc. of the 8th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. Atlanta: ACM Press, 2002.148 - 159.
- 3 Rahul C. Shah, Sumit Roy, Sushant Jain, etc. Data MULEs: Modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks. Ad Hoc Networks. 2003:215 - 233.
- 4 石高涛,廖明宏. 传感器网络中具有负载平衡的移动协助数据收集模式.软件学报, 2007,18(9):2235 - 2244.
- 5 Zhou Z, Xiang X, Wang X. An Energy-Efficient Data-Dissemination Protocol in Wireless Sensor Networks. IEEE WoWMoM, Jun. 2006.
- 6 刘明,曹建农,陈贵海,陈力军,王晓敏,龚海刚.EADEEG:能量感知的无线传感器网络数据收集协议.软件学报, 2007,18(5):1092 - 1109.
- 7 Richard W.N. Pazzi, Azzedine Boukerche. Mobile data collector strategy for delay-sensitive applications over wireless sensor networks. Computer Communications, 2008, 31(5):1028 - 1039.
- 8 Jorge Nuevo, Jean-Charles Gregoire. Analysis of the effects of entity mobility models on ad hoc network communication. SPECTS 2003.
- 9 JOG P, SUH JY, VAN GUCHT D. Parallel genetic algorithms applied to the traveling salesman problem. Report No. 314, Computer Science Department, Indiana University, Bloomington, 1990.