

# 无线传感器网络中的路由协议研究<sup>\*</sup>

汪祥莉<sup>1</sup> 李腊元<sup>1</sup> 王文波<sup>2</sup>(武汉理工大学计算机科学与技术学院 武汉 430063)<sup>1</sup> (武汉科技大学理学院 武汉 430081)<sup>2</sup>

**摘要** 无线传感器网络作为计算、通信和传感器三项技术相结合的产物,是一种全新的信息获取和处理技术。本文首先简要介绍无线传感器网络体系结构和性能标准,然后着重从路由协议方面比较分析无线传感器网络的多种典型的路由协议,指出了各自的特色,最后指出了下一步的研究趋势。

**关键词** 无线传感器网络, ad hoc 网络, 路由协议

## Research on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks

WANG Xiang-li<sup>1</sup> LI La-yuan<sup>1</sup> WANG Wen-bo<sup>2</sup>(School of Computer Science and Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)<sup>1</sup>(School of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)<sup>2</sup>

**Abstract** Wireless Sensor Networks (WSNs) are the products which integrate computation techniques, communication techniques and sensor techniques. WSNs are the brand-new techniques of information processing. This paper firstly simply introduces architecture and performance measures of WSNs. Then it emphatically analyzes and compares some typical routing protocols of WSNs and points out respective characteristics. Finally, the future trends of research on routing protocols for WSNs are put forward.

**Keywords** Wireless sensor networks, Ad hoc networks, Routing protocol

## 1 引言

随着传感器技术、嵌入式技术、分布式信息处理技术和无线通讯技术的发展,以大量的具有微处理能力的微型传感器节点组成的无线传感器网络(WSNs)逐渐成为学术界的研究热点问题<sup>[1-4]</sup>。无线传感器网络由一组尺寸小、能耗低和价格低的传感器节点构成。由于传感器节点具有传感、计算和无线通信功能,因此在军事、环境监测、家用、医疗卫生和商业等领域,WSNs 将有更为广泛的应用前景。

WSNs 与无线 ad hoc 网络相比,主要具有以下特点<sup>[1,2]</sup>:

(1) WSNs 节点移动性不强,一般不移动或很少移动;(2) WSNs 节点通信能耗高,而数据计算能耗低;(3) WSNs 是任务型的网络,主要用于监测功能,是以数据为中心的网络;(4) WSNs 往往规模较大,为实现区域监测任务,一般有成千上万的传感器节点密集部署在目标区域,具有高度的应用相关性;(5) WSNs 节点由于受成本、体积及功耗的限制,其计算能力、通信能力和内存空间更有限;(6) WSNs 中节点通常数量大且随机布置,一般关心的是监测区域的感知数据,而不是具体由哪一个节点获取的信息,所以 WSNs 节点一般不统一编址;(7) WSNs 节点因为能量耗尽而易失效,网络动态性较强,所以 WSNs 路由设计的重要目标是降低节点能量损耗,提高网络生命周期。

以上这些导致了无线 ad hoc 网络路由协议不能直接用于 WSNs 中,许多新的适用 WSNs 的路由协议被提出,并已经成为 WSNs 研究中的热点。本文首先介绍 WSNs 的体系

结构,然后对当前比较重要的 WSNs 路由协议按照网络结构进行了分类,并对典型协议进行了分析和比较,最后指出了将来的研究趋势,为路由协议的进一步研究提供参考。

## 2 无线传感器网络体系结构与性能标准

WSNs 体系结构如图 1 所示。它主要由以下部分组成<sup>[2]</sup>:传感器节点、接收发送器(Sink)、Internet 或通信卫星、任务管理节点等部分。传感器节点分布在感知区域内,采集与观察对象相关的数据,并将协同处理后的数据传送到 Sink。Sink 可以通过 Internet 或通信卫星实现传感器网络与任务管理节点通信。WSNs 路由协议的任务是在传感器节点和 Sink 节点之间建立路由,可靠地传递数据。

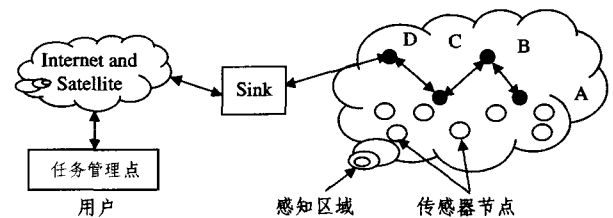


图 1 无线传感器网络体系结构

评价一个 WSNs 的路由设计是否成功,往往采用如下性能标准<sup>[2]</sup>:(1)能源有效性。这是延长网络生存期的重要目标;(2)可靠性。部分传感器节点的失效不应影响整个网络的正常运行,具有较高的容错性;(3)可扩展性。路由设计应能

<sup>\*</sup>国家自然科学基金资助项目(60672137)和教育部高等学校博士点基金资助项目(20060497015)。汪祥莉 讲师,博士生,主要研究领域为高性能网络技术与路由算法;李腊元 教授,博士生导师,主要研究领域为高性能网络技术与通信协议;王文波 讲师,博士,主要研究领域为小波分析及其应用。

满足传感器数量、生命周期、时延等方面的扩展需求；(4)时延性。必须尽可能减少时延，提高网络的可用性和应用范围。

### 3 无线传感器网络路由协议分析

WSNs 路由协议如图 2 所示，根据网络结构主要可以分为三类<sup>[5]</sup>：平面式 (flat-based)、层次式 (hierarchical-based) 和基于位置 (location-based) 的路由协议。这些路由协议根据协议操作又可以进一步分为基于多路径 (multipath-based)、基于查询 (query-based)、基于协商 (negotiation-based)、基于服务质量 (QoS-based) 和基于耦合 (coherent-based) 等路由协议。下面对当前较为重要的 WSNs 路由协议进行分析。

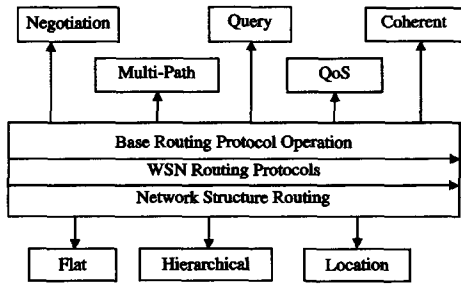


图 2 无线传感器网络路由协议

#### 3.1 平面式 (flat-based) 路由协议

##### (1) Flooding 协议

Flooding<sup>[6]</sup>是一种传统的洪泛式路由技术，不需要维护网络的拓扑结构和路由计算，节点将产生或接收到的数据包向所有邻节点广播。这个过程重复执行，直到数据包到达目的地或者达到预先设定的最大跳数。

优点：①实现简单，不需要任何算法；②不需要维护路由信息和路由计算；③适用于健壮性要求高的场合。

缺点：①存在信息“内爆”(implosion)问题，即同一节点收到来自多个邻节点的相同的数据；②出现部分重叠 (overlap) 现象，即同一节点收到来自监控同一区域的多个节点的部分或几乎相同的数据；③“资源盲点”(resource blindness)问题，即节点不考虑自身的资源限制，在任何情况下都转发数据。

Gossiping<sup>[7]</sup>协议是对 Flooding 的改进，在 Gossiping 中，节点只是任意选择一个邻节点转发数据，而不是向所有邻节点广播数据，这样避免了内爆问题，但是增加了传输时延。

##### (2) SPIN (sensor protocol for information via negotiation) 协议

SPIN<sup>[4,8]</sup>是一种以数据为中心的自适应通信路由协议，能够在基于能量约束的 WSNs 中有效地传播信息，并通过节点间的协商机制解决网络中冗余数据的传输。传感器节点使用元数据来命名数据，命名方式没有统一的标准。SPIN 协议有 3 种类型的消息，即 ADV, REQ 和 DATA。当某个节点有 DATA 数据包要发送时，就使用 ADV 消息进行广播；当某个节点希望接收 DATA 数据包时，就发送 REQ 消息进行请求；DATA 为传感器采集的数据包。此外，SPIN 协议有 4 种类型，其中 SPIN-PP 和 SPIN-EC 用于点到点通信模式，SPIN-BC 和 SPIN-RL 用于广播网络。

优点：①减轻了 Flooding 协议中存在的内爆、重叠和资源盲点问题；②不维护邻居节点信息，适应节点移动的情况。

缺点：①会出现“数据盲点”，即当节点有数据要发送时，而其所有邻节点都不需要该数据，则导致该数据不能继续转

发，从而影响整个网络信息的收集；②不适用于高密度节点分布的情况。

##### (3) DD (directed diffusion) 协议

DD 模型<sup>[9]</sup>是一种基于数据的、查询驱动的路由协议。该协议的整个过程可以分为兴趣扩散、梯度建立以及路径加强三个阶段，如图 3 所示。兴趣 (interest) 是用户提出的查询任务，该任务是用一组属性/值来表示，包括任务的类型、目标范围、持续时间、发送速率和时间戳等，通常该查询任务是用 sink 节点发出，而且在每个节点产生的数据也是用一组属性/值对来命名。在兴趣扩散阶段，sink 节点向其邻节点广播兴趣消息。每个传感器节点在收到该消息后，将其暂存在 cache 中以避免环路。梯度 (gradient) 是接收兴趣消息的节点产生的向量，其方向是指向发送兴趣消息给自己的邻节点，其值表示向该方向继续搜索获得匹配数据的可能性。当消息传遍了目标范围后，传感器节点和 sink 节点之间建立起一个梯度场。当传感器节点检测到 sink 节点的数据后，它就会根据建立的梯度场沿着多条路径向 sink 节点发送试探性数据，从中选择并强化 (reinforce) 最优路径进行真正数据的传递。

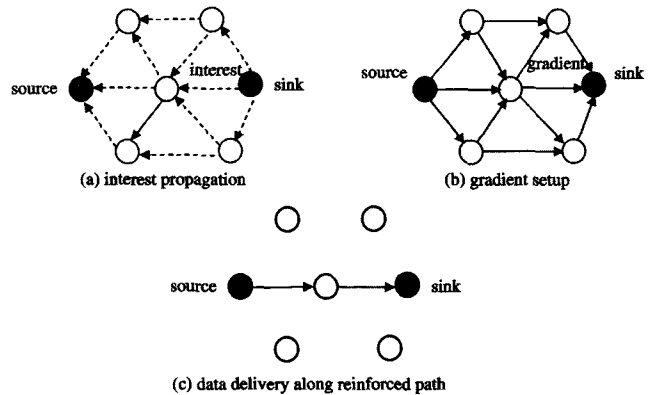


图 3 定向扩散路由机制

优点：①考虑了网络动态性，稳定性好；②数据聚合可以减少数据通信量；③传感器节点的能量利用率高；④根据查询事件来按需建立路由，节点不需要保存网络全局信息。

缺点：①在数据聚合过程采用时间同步技术，这在 WSNs 中是不容易实现的；②梯度的建立和时间同步技术会引入较多的开销；③不适合环境监测等应用。

##### (4) SAR (sequential assignment routing) 协议

SAR<sup>[10]</sup>是一种提供 QoS 保证的先应式路由协议。为了在传感器节点和 sink 节点之间创建多条路径，sink 的每个一跳邻节点都以自己为根生成树并向外生长。每个树的创建都考虑了能耗、分组的优先级别和其他的 QoS 指标，SAR 协议的目标是在网络的生存期内将平均加权 QoS 指标最小化。数据沿着最优路径传输，并且在链路或节点失效的情况下，可以选择其他路径传输。

优点：①能够提供 QoS 保证；②采用多路径策略，健壮性好，避免了在链路或节点失效时重新选择路径的开销。

缺点：①节点为了保存多条路径的信息，从而浪费了很多存储空间；②由于是先应式路由协议，因此网络信息的维护需要耗费较大的开销。

#### 3.2 层次式 (hierarchical-based) 路由协议

(1) LEACH (low energy adaptive clustering hierarchy) 协议

LEACH<sup>[11]</sup>是一种低功耗的自适应聚类路由协议。该算法通过周期性随机选择聚类首领,以均衡网络中节点的能耗。LEACH 协议的实现被分成若干“轮”(round),每一轮由初始化和稳定工作两个阶段组成。为了减少开销,稳定阶段通常比初始化阶段的时间要长。在初始化阶段,首先随机选择聚类首领,一旦首领产生,则主动广播该信息。非首领节点根据接收的信号强度来选择它所加入的聚类,并通知聚类首领。在稳定工作阶段,节点采用 TDMA 方式,在必要的情况下向其聚类首领发送监测数据,由聚类首领对数据进行必要的融合处理之后,再发送到 sink 节点。持续一段时间后,进入下一轮并重新选择聚类首领。聚类首领的数量最好是整个网络节点数的 5%。聚类首领的建立过程是:节点从 0 到 1 的随机数中任意选择一个数值,若当前轮中这个数值小于设定的阈值  $T(n)$ (如下公式),则该节点成为聚类首领。

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p \times (r \bmod \frac{1}{p})}, & n \in G \\ 0, & \text{others} \end{cases}$$

其中  $p$  为期望的聚类首领在所有传感节点中的百分比; $r$  是当前轮数; $G$  是在最后的  $1/p$  轮中未成为聚类首领的节点集。

优点:随机选择聚类首领,均衡网络中节点的能耗,与一般的多跳路由协议和静态聚类算法相比,LEACH 可以将网络生命周期延长 15%。

缺点:①对聚类首领的能量要求较高,在监测面积范围大的应用中不适用;②每轮聚类的动态生成引入了较大的额外开销;③该协议只适合通信量较稳定的情况,不适合实时通信。

(2) TEEN (threshold sensitive energy efficient sensor network) 协议

TEEN<sup>[12]</sup>是一种与 LEACH 实现方式相似的低功耗聚类路由协议,只是 TEEN 是反应式(reactive)协议,而 LEACH 是先应式(proactive)协议,而且 TEEN 可以适用于实时通信,比 LEACH 更有效。该协议定义了两个临界值,分别是硬临界值(HT)和软临界值(ST)。当节点监测到的数据第一次达到 HT 时,节点就会向聚类首领报告该数据,同时将该数据作为传感值(SV)保存在节点上。此后,只有当监测到的数据大于 HT,并且当前数据与 SV 之差的绝对值大于或等于 ST 时,节点才会向聚类首领报告监测到的数据,并将该数据作为新的 SV。

优点:①通过设置硬、软临界值,减少节点向聚类首领报告监测数据的次数,从而降低能耗;②能够适用于实时通信。

缺点:①由于设置硬、软临界值,屏蔽了一些小于临界值的数据,可能会使某个或某些节点在一段时间内没有机会向聚类首领报告监测数据,从而无法判断节点是否正常运行;②不适合需要周期性采样的网络;③数据一旦达到临界值,节点就立即发送,这样容易造成信号干扰。

(3) PEGASIS (power-efficient gathering in sensor information systems) 协议

PEGASIS<sup>[13]</sup>借鉴了 LEACH 中分簇算法的思想,是一种接近最优的基于链的路由协议。该协议设定一个基站(BS),与所有节点相隔一段较远的距离,并假设所有节点同构和静止,具有相同的能量约束,掌握网络全局信息。协议的核心思想是所有节点形成一个聚类,采用贪婪算法构造出一条链。聚类首领负责数据的收集和融合,然后提交给 BS,每轮只有一个节点向基站发送数据。数据在传递过程中,节点仅与自己最近的邻节点通信。

优点:①每轮只有一个节点与 BS 通信,降低数据通信量;②每个节点使用最小功率传递数据,可以降低节点能耗,延长网络生存期;③避免聚类的动态生成带来的开销。

缺点:①成链算法要求节点维护网络全局信息,开销很大;②由于所有节点就是一个聚类,这样对聚类首领的要求很高;③如果网络节点量较大,那么形成的链就会很长,这样会增加数据传输时延。

### 3.3 基于位置(location-based)路由协议

GEAR<sup>[4,14]</sup>(geographic and energy aware routing)协议是一种基于地理位置和能量感知的路由协议,是对 DD 协议在能耗方面的改进。在该协议中,每个节点保存着通过其邻节点到达目的节点的估价成本和学习成本,其中估价成本综合考虑了节点剩余能量和到达目的节点的距离;学习成本是对估价成本的改进,考虑了“洞”周围的路由情况。当节点到达目标区域的距离小于它与任何一个邻节点的距离时,就认为存在“洞”,否则估价成本等于学习成本。该协议的实现包括两个阶段:在第一阶段中,节点根据最小成本选择下一跳节点,直至将数据传递到目标区域内;在第二阶段中,采用洪泛或递归方法将目标区域中的数据传递给目的节点。

优点:①利用位置信息将数据中转到目标区域,减少中间节点的参与,节约能耗,延长网络生存期;②随机选择路由方式,平衡通信量。

缺点:①成本的计算和剩余能量的测量需要一定的能耗;②需要 GPS 计算节点位置信息,成本较高;③路由过程中可能会遇到“洞”,降低路由效率。

表 1 WSNs 路由协议的比较

	Flooding	Gossiping	SPIN	DD	SAR	LEACH	TEEN	PEGASIS	GEAR
路径优化能力	最短路径	×	possible	possible	×	×	×	×	次优路径
多径/单径	多径	单径	多径/单径	多径	多径/单径	单径	单径	单径	单径
支持节点移动	√	√	√	×	×	×	×	×	×
先应式/反应式	先应式/反应式	先应式/反应式	反应式	先应式	先应式	先应式	反应式	先应式	先应式
数据聚合	×	×	√	√	×	√	√	√	√
协议类型	平面	平面	平面	平面	平面	层次	层次	层次	基于位置
QoS-aware	×	×	×	√	√	×	×	×	×
网络生存期	不长	不长	长	长	长	长	长	长	长

构和计算环境的异构性均影响 DAG 模型中节点计算时间和通信时间,并利用标准方差和平均值之和逼近任务的实际运行时间。在此基础上,对 DAG 调度中常用调度算法 SCP 算法进行详细分析并作了改进,提出了扩展的随机 DAG 的调度方法 SSCP 算法。同时,给出了扩展的随机 DAG 中节点的 EST 计算方法,并以 SCP 算法为例进行分析研究。实验结果表明,SSCP 算法相对于 ETF 和 SCP 算法,有效地减少了并行任务执行时间,并能更精确地预测任务调度的平均执行时间,使其调度长度和实际运行时间值更接近。基于此扩展随机 DAG 的其它调度算法的研究将在后续的工作完成。

### 参考文献

- [1] Grajcar M. Genetic list scheduling algorithm for scheduling and allocation on a loosely coupled heterogeneous multiprocessor system// Proceedings of the 36th Design Automation Conference. 1999;280-285
- [2] Chan Wai-Yip, Li Chi-Kwong. Scheduling tasks in DAG to heterogeneous processor system// Proceedings of the Sixth Euro-micro Workshop on Parallel and Distributed Processing(PDP'98). Jan. 1998;27-31
- [3] Chan Wai-Yip, Li Chi-Kwong. Heterogeneous Dominant Sequence Cluster (HDSC): a low complexity heterogeneous scheduling algorithm// IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing. Aug. 1997,2:956-959
- [4] Liu Zhen. Scheduling of random task graphs on parallel processors// Proceedings of the Third International Workshop on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS '95). Jan. 1995;143-147
- [5] Kwok Yu-Kwong. Parallel program execution on a heterogeneous PC cluster using task duplication// Proceedings of the 9th Heterogeneous Computing Workshop, 2000 (HCW2000). May 2000;364-374
- [6] Liu Zhenying, Fang Binxing, Zhang Yi, et al. Scheduling algorithms for a fork DAG in a NOWs// Proceedings of the Fourth International Conference/Exhibition on High Performance Computing in the Asia-Pacific Region. May 2000.2:959-960
- [7] Woo Sung-Ho, Yang Sung-Bong, Kim Shin-Dug, et al. Task scheduling in distributed computing systems with a genetic algorithm// High Performance Computing on the Information Superhighway(HPC Asia '97). May 1997;301-305
- [8] Hou E S H, Ansari N, Ren H. A genetic algorithm for multiprocessor scheduling// IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. Feb. 1994;113-120
- [9] Kamthe A, Lee Soo-Young. A Stochastic Approach to Estimating Earliest Start Times of Nodes for Scheduling DAGs on Heterogeneous Distributed Computing Systems [J]// Proceedings of the 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium, 2005
- [10] Midorikawa E T, de Oliveira H M, Laine J M. PEMPIs: A New Methodology for Modeling and Prediction of MPI Programs Performance [J]// 16th Symposium on Computer Architecture and High Performance Computing (SBAC-PAD '04). Sbac-pad, 2004;246-253
- [11] Wu C E, Bolmarcich A. Gantt Chart Visualization for MPI and Apache Multi-Dimensional Trace Files [J]. ICPADS 2002;523-528
- [12] Wu Min-You, Shu Wei, Yong Chen. Runtime Parallel Incremental Scheduling of DAGs [J]// International Conference on Parallel Processing. August 2000;541-548
- [13] 陈昌生,孙永强,何积丰. 一个可预测并行程序效率的评价模型[J]. 软件学报,2000,11(11):1485-1491
- [14] Iverson M A, zguener F O, Potter L. Statistical Prediction of Task Execution Times through Analytic Benchmarking for Scheduling in Heterogeneous Environment [J]. IEEE Transactions on Computers, 1999,48(12):1374-1379
- [15] Stark H, Woods J W. Probability, Random Processes, and Estimation Theory for Engineers. Prentice Hall, 1994

(上接第 52 页)

## 4 无线传感器网络路由协议比较

第 3 部分分析了每种协议的特点,这些协议针对特定的应用而设计,在不同的环境表现出各自的特色和优势,因此不能绝对地判断哪种协议最优。表 1 分别从是否提供最优路径、是提供多路径还是单路径、是否支持节点移动、协议是先应式还是反应式、是否支持数据聚合、协议类型、是否支持 QoS 和网络生存期等方面,对这些协议进行了比较<sup>[1]</sup>。

**结束语** 本文针对当前主要的 WSNs 路由协议进行了比较分析。从分析中表明,每种协议之间是相互关联的,并且一个好的 WSNs 路由协议应具备如下特点:①动态地选择汇聚节点的能力;②快速的数据融合技术;③随机路径选择能力。通过对当前各种路由协议的分析与总结,可以看出将来的 WSNs 路由协议的研究策略与发展趋势<sup>[1]</sup>:①减少通信量以节约能量;②保持通信量负载平衡;③路由协议应具有容错性;④路由协议应具有安全机制;⑤ WSNs 路由协议将继续向基于数据、基于位置的方向发展。

### 参考文献

- [1] 唐勇,周明天,张欣. 无线传感器网络路由协议研究进展. 软件学报,2006,17(3):410-421
- [2] 李建中,李金宝,石胜飞. 传感器网络及其数据管理的概念、问题与进展. 软件学报,2003,14(10):1717-1727
- [3] 崔莉,鞠海玲,苗勇,等. 无线传感器网络研究进展. 计算机研究与发展,2005,42(1):163-174
- [4] Shijin D, Xiaorong J, Lemin L. Research and analysis on routing protocols for wireless sensor networks// Proceedings of International Conference on Communications, Circuits and Systems, 2005,1:407-411
- [5] Abd-El-Barr M I, Al-Otaibi M M, Youssef M A. Wireless Sensor Networks-Part II: Routing Protocols and Security Issues// 2005 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. 2005;69-72
- [6] Heinzelman W R, Kulik J, Balakrishnan H. Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks// Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE Conference on Mobile Computing and Networking. Seattle: ACM press, 1999;174-185
- [7] Haas Z J, Halpern J Y, Li L. Gossip-based ad hoc routing// Proceedings of the IEEE INFOCOM. New York: IEEE Communications Society, 2002;1707-1716
- [8] Kulik J, Heinzelman W R, Balakrishnan H. Negotiation based protocols for disseminating information in wireless sensor networks. Wireless Networks, 2002,8(2/3):169-185
- [9] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D, et al. Directed diffusion for wireless sensor networking. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2003,11(1):2-16
- [10] Sohrabi K, Gao J, Ailawadhi V, et al. Protocols for self-organization of a wireless sensor network. IEEE Personal Communications, 2000,7(5):16-27
- [11] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks// Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences. 2000,2:10
- [12] Manjeshwar A, Agrawal D P. TEEN: A routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks// Proceedings of the 15th Parallel and Distributed Processing Symposium. San Francisco: IEEE Computer Society, 2001;2009-2015
- [13] Lindsey S, Raghavendra C S. PEAGSIS: Power-efficient gathering in sensor information systems// Proceedings of the IEEE Aerospace Conference Montana; IEEE Aerospace and Electronic Systems Society. 2002;1125-1130
- [14] Yu Y, Estrin D, Govindan R. Geographical and energy-aware routing: A recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks. Technical Report. UCLA-CSD TR-01-0023. UCLA Computer Science Department, May 2001