

无线传感器网络的路由协议研究

敬海霞, 胡向东

(重庆邮电大学 自动化学院, 重庆 400065)

摘要:无线传感器网络(WSNs)是计算机、通信和传感器3项技术相结合的产物,因其巨大的应用前景受到了越来越广泛的关注。介绍了WSNs的一些特点,指出传统路由协议不能有效应用于WSNs的路由协议;然后分类阐述了当前较为典型的路由协议,分析了它们的优缺点;对比分析了这些协议的特点;总结了路由协议设计应满足的要求、存在的挑战以及可能的研究方向。

关键词:无线传感器网络;路由协议;分层次的路由;SPEED

中图分类号:TP393

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2007)10-0150-05

A Survey of Routing Protocols in Wireless Sensor Networks

JING Hai-xia, HU Xiang-dong

(School of Automation, Chongqing University of Post and Telecommunication, Chongqing 400065, China)

Abstract: As a novel technology of information acquisition and processing, wireless sensor networks have been paid high attention for its huge application promise. In this paper, introduce the characteristics of wireless sensor networks system, and show that the routing protocols in wireless sensor networks differ from traditional routing protocols and have its own performances; then describe all kinds of routing protocols for wireless sensor networks, and present a critical analysis of these protocols. Furthermore, give a contrast and comparison to these protocols. Finally, conclude with some designing requirements of routing protocols in wireless sensor networks and possible future research areas.

Key words: wireless sensor networks; routing protocols; hierarchical routing protocols; SPEED

0 引言

计算机技术、无线通信技术和微电子技术的进步,推动了低功耗多功能传感器的快速发展,使其在微小体积内能够集成信息采集、数据处理和无线通信等多种功能。这种灵巧的多功能智能微型传感器可以安置在地面、空中、水中、大楼里、交通工具上,甚至身体内,测量周边环境中的热、红外、声纳、雷达和地震波等信号,从而探测包括温度、湿度、噪声、光强度、压力、土壤成分,及移动物体的大小、速度和方向等众多人们感兴趣的物质现象,并通过无线链路构成灵活的网络,这就是无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)。由于WSNs具有配置灵活、组网方便、应用范围广等优势,在军事国防、环境监测、空间探索、生物医疗、抢险

救灾以及商业应用等领域具有广阔的应用前景^[1,2]。

WSNs与传统固定网络有很大的不同,虽然与MANET(mobile ad hoc network)都是无线自组织多跳网络,但差异仍很大。WSNs节点数目大且分布稠密,数据存在很大的冗余;节点的能量、存储能力、处理能力和通信能力等十分有限且节点能量难以补充;WSNs拓扑结构易变化;WSNs节点一般没有统一编址^[1~3]。因此众多传统固定网络与MANET的路由协议不能有效地应用于WSNs,需要为传感器网络研究新的有效的路由协议。目前WSNs的路由协议的研究已经引起了人们的广泛关注。

1 WSNs路由协议

路由协议是组网的基础,其主要任务就是建立能量高效的优化路径和可靠地传输传感器节点到Sink节点的数据^[4]。目前国内外科研人员已设计了多种面向WSNs的路由协议,将其分为四类:以数据为中心的、分层次的、基于位置的、基于数据流模型和服务质量(QoS)要求的。

收稿日期:2006-12-25

基金项目:重庆市科委自然科学基金项目(2006BB2430);重庆邮电大学博士基金项目(A2007-03)

作者简介:敬海霞(1981-),女,四川人,硕士研究生,研究方向为无线传感器网络;胡向东,博士,教授,研究方向为复杂系统建模与优化、网络测控系统及其信息安全。

1.1 以数据为中心的路由协议

此类路由协议是基于查询和目标数据命名之上的,通过数据融合减少冗余的数据传输。

1.1.1 Flooding 协议和 Gossiping 协议

这是两个最经典和简单的传统网络路由协议^[5]。在 Flooding 协议中,节点产生或收到数据后向所有邻节点广播,数据包直到过期或到达目的地才停止传播。该协议具有严重缺陷:内爆(Implosion,节点几乎同时从邻节点收到多份相同数据)、交叠(Overlap,节点先后收到监控同一区域的多个节点发送的几乎相同的数据)、资源利用盲目(Resource blindness,节点不考虑自身资源限制,在任何情况下都转发数据)。Gossiping 协议是对 Flooding 协议的改进,节点将产生或收到的数据随机转发,避免了内爆,但增加了时延。这两个协议不需要维护路由信息,也不需要任何算法,简单但扩展性很差。

1.1.2 SPIN 协议

SPIN^[6](Sensor Protocols for Information via Negotiation)协议节点利用三种消息进行通信:ADV(数据描述)、REQ(数据请求)和 DATA(数据)。该协议以抽象的元数据对数据进行命名,命名方式没有统一标准。节点产生或收到数据后,用包含元数据的 ADV 消息向邻节点通告,需要数据的邻节点用 REQ 消息提出请求,然后将 DATA 消息发送到请求节点。该协议的优点是 ADV 消息减轻了内爆问题;通过数据命名解决了交叠问题;节点根据自身资源和应用信息决定是否进行 ADV 通告,避免了资源利用盲目问题;与 Flooding 和 Gossiping 协议相比,有效地节约了能量。其缺陷是:SPIN 的广播机制不能保证数据的可靠传送,当产生或收到数据的节点的所有邻节点都不需要该数据时,将导致数据不能继续转发,以致较远节点无法得到数据;而当某 sink 点对任何数据都需要时,其

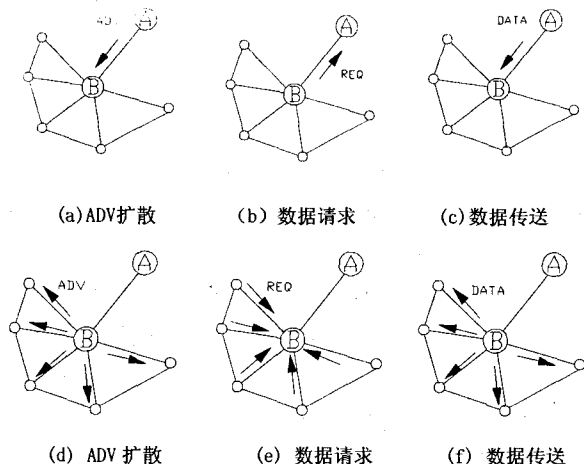


图 1 SPIN 协议的路由建立与数据传输

周围节点的能量容易耗尽。图 1 表示了 SPIN 协议的路由建立与数据传输。

1.1.3 Directed Diffusion 协议

定向扩散(Directed Diffusion, DD)协议^[7]用一组属性值命名它生成的数据。为建立路由, sink 节点在整个网络或部分区域内 flooding 包含查询任务的 Interest 消息;沿途节点按需对各 Interest 进行缓存与合并,并根据 Interest 计算、创建包含数据上报率、下一跳等信息的梯度(gradient),从而建立多条指向 sink 点的路径。Interest 中的地理区域内节点则按要求启动监测任务,并周期性地上报数据,途中各节点可对数据进行缓存与聚合; sink 点可在数据传输过程中通过对某条路径发送上报间隔更小或更大的 Interest,以增强或减弱数据上报率。该协议的优点是:采用多路径,健壮性好;使用数据聚合减少了数据通信量; sink 点根据实际情况采取增强或减弱方式有效利用能量;使用查询驱动机制按需建立路由,避免了保存全网信息。其缺点是:不适合环境监测等应用;建立梯度开销很大,不适合多 sink 点网络;数据聚合采用时间同步技术,带来较大开销和时延。图 2 表示了 Directed Diffusion 协议的路由建立过程。

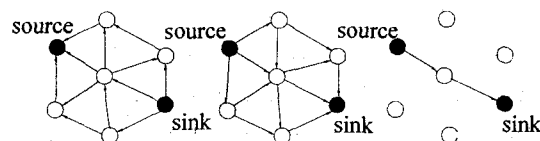


图 2 Directed Diffusion 协议的路由建立过程

1.1.4 Rumor 协议

Rumor 协议^[8]引入了查询消息的单播随机转发。当节点监测到事件后将其保存,并创建称为代理(Agent)的生命周期较长的包括事件和源节点信息的数据包,将其按一条或多条随机路径在网络中转发,收到 Agent 的节点根据事件和源节点信息建立反向路径,并将 Agent 再次随机发送到相邻节点,并可在再次发送前在 Agent 中增加其已知的事件信息。同时 sink 节点的查询请求也沿着一条随机路径转发,当两路径交叉时则路由建立;如不交叉, sink 点可 flooding 查询请求。该协议优点是:适用于多 sink 点、查询请求数目很大、网络事件很少的情况。其缺点是:如果事件非常多,维护事件表和收发 Agent 带来的开销会很大;且因 Rumor 协议使用随机方式生成路径,数据传输路径不是最优,甚至可能存在路由环路问题。图 3 表示了 Rumor 协议中 Agent 路径与查询路径的交叉情形。

1.2 分层次的路由协议

此类路由协议是让节点参与到特定的节点簇内的多跳通信,簇头再进行数据聚合,减少向 sink 节点传

送的消息数量,从而达到节省能量和提高可扩展性的目的^[4]。

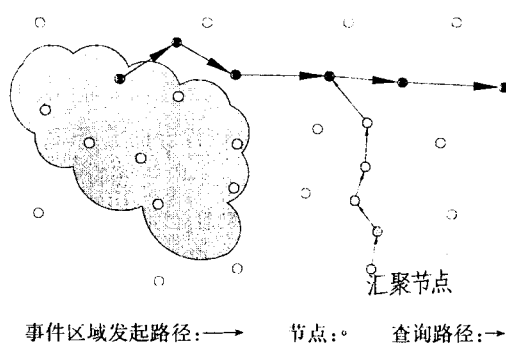


图3 谣传路由原理图

1.2.1 LEACH 协议

LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) 协议^[9]的具体实现过程分两个阶段:成簇阶段和稳定阶段(即数据传输阶段),这两个阶段的时间总和为一轮(round)。在成簇阶段,每个节点选取一个介于0和1之间的随机数,如果这个数小于某个阈值,该节点成为簇头;然后,簇头向所有节点广播自己成为簇头的消息,每个节点根据接收到广播信号的强弱来决定加入哪个簇,并回复该簇头。在数据传输阶段,簇内的所有节点按照 TDMA(时分复用)时隙向簇头发送数据,簇头将数据融合和计算。在簇间,各簇头节点采用 CSMA 协议竞用通道,获得通道的簇头将融会的数据发给基站。之后进行下一轮。该协议优点是:随机选举簇头避免簇头过分消耗能量,提高了网络生存时间;数据聚合有效减少了通信量。其缺点是:协议采用一跳通信,虽然传输时延小,但要求节点具有较大功率通信能力;扩展性差,不适合大规模网络;即使在小规模网络中,离 sink 点较远的节点由于采用大功率通信也会导致生存时间较短;而且频繁簇头选举引发的通信量耗费了能量。

1.2.2 TEEN 协议

TEEN^[10] (Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol) 采用类似 LEACH 的分簇算法,该协议设置了硬、软两个门限,只有同时满足两个门限时节点才发送数据。硬门限的初值由用户根据应用确定;软门限的初值为0。在每轮簇头轮换的时候将两个阈值广播出去,当监测数据第一次超过设置的硬门限时,节点把这次数据设为新的硬门限,并在接下来的时隙内发送它。之后,只有监测数据超过硬门限并且监测数据的变化幅度不小于软门限时,节点才会传送最新的监测数据,并将它设为新的硬门限。通过设定两个门限值,在检测精度和系统能耗之间取得合理的平衡。采用这样的方法,可以监视一些突发事件和热

点地区,减少网络通信量。但 TEEN 存在两个缺陷:一是如果门限值不能达到,节点不会传送任何数据;二是数据一旦符合门限值要求,节点立即传送,容易造成信号干扰,如果采用 TDMA,则会造成数据延迟。

1.2.3 TTDD (Two Tier Data Dissemination)

TTDD^[11] (Two Tier Data Dissemination) 协议适用的环境为静止传感区域内的移动 sink 节点和多 sink 节点的情形。当兴趣出现时,周围的节点选择其中一个节点作为源节点发送数据,源节点以自己作为一个格状网的交叉点构造一个格状网。主要过程是:源节点先计算出相邻交叉点位置,利用贪婪算法请求最接近该位置的节点成为新交叉点,新交叉点继续该过程直至请求过期或到达网络边缘。保存了事件和源节点信息的交叉点选作传输节点(dissemination node)。数据查询时,sink 本地洪泛查询请求到最近的传输节点,此后查询请求在传输点间传播直至源节点,数据则反向传送到 sink 节点。该协议的优点是:在传输过程中,传输节点对数据进行汇聚处理,减少了数据的传输开销;该协议采用单路径,与 Diffusion 协议相比,能够提高网络生存时间。其缺点是:节点必须知道自身位置;非 sink 点位置不能移动;要求节点密度较大;且子网的构造过于复杂,计算与维护格状网的开销较大;算法不具有能量感知功能。

1.3 基于位置的路由协议

此类路由协议利用节点的位置信息,把查询或者数据转发给需要的区域而不是整个网络,缩减数据的传送范围进而降低能耗。此外,设计时考虑了节点的移动性。

1.3.1 GAF 路由协议

GAF^[12] (geographical adaptive fidelity) 主要为移动 Ad-hoc 网络设计,但是也用在传感器网络中。该协议把监测区域划分成虚拟单元格,将节点按照位置信息划入相应的单元格;在每个单元格中定期选举产生一个簇头节点,只有簇头节点保持活动,其他节点进入睡眠状态。在 GAF 中,节点轮流从睡眠状态变到工作状态,达到网络负载均衡。为了处理节点的移动性,节点估算自己离开网络的时间并将之通知相邻节点,因而睡眠节点可以相应调整睡眠时间,在工作节点离开本网格之前醒来接替工作,从而保持路由精度。GAF 的优点是节点数量增加可大大提高网络寿命,同时它解决了节点移动性的问题。但是 GAF 的缺陷是在节点稀疏的情况下的节能效果不好,而且网格簇头的选择是随机的,没有考虑节点剩余能量。

1.3.2 GEAR 路由协议

GEAR^[13] (geographical and energy aware routing)

协议假设已知事件区域的位置信息,每个节点知道自己的位置信息和剩余能量信息,通过一个简单的 Hello 消息交换机制知道所有邻居节点的位置信息和剩余能量信息。将数据分组传送到目标域中所有的节点分两个阶段:目标域数据传送和域内数据传送。在目标域数据传送阶段,当节点接收到数据分组,它将邻接点同目标域的代价和自己与目标域的代价相比较,代价更小,则选择最小代价的邻接点作为下一跳节点;若不存在更小代价,则认为存在路由空洞“hole”,节点将根据邻居的最小代价来选择下一跳节点。在域内数据传送阶段,可通过域内直接洪泛和迭代的目标域数据传送这两种方式让数据在域内扩散直到目标域剩下唯一的节点。GEAR 的优点是:它将网络中扩散的信息局限到适当的位置区域中,减少了中间节点的数量,从而降低了路由建立和数据传送的能源开销,进而更有效地提高了网络的生命周期。其缺点是依赖节点的 GPS 定位信息,成本较高。

1.4 提供数据流和服务质量保障的路由协议

此类协议在提供数据路由功能的同时满足通信服务质量要求,建立路由路径的同时考虑端对端的时延要求。

1.4.1 SAR

SAR^[14](Sequential Assignment Routing)是首先在路由判决中将 QoS 考虑进去的 WSNs 路由协议。SAR 在每个节点与 sink 节点间生成多条路径,维护多个树结构,每个树以落在 sink 的有效传输半径内的节点为根向外生长,树干的选择需要满足一定的 QoS 要求和能量储备。这样使大多数节点可能同时属于多个树,可任选某一采集树回到 sink。为了防止一些节点的死亡而导致网络拓扑结构的变化,sink 会定期发起路径重建命令来保证网络的连通性。同时,SAR 使用本地路径恢复机制的握手过程及增强路由表中每条路径上下行数据流的连通性来恢复错误。SAR 的一个突出

的优点是综合考虑了能效和 QoS。虽然节点到 sink 的多条路径增强了 SAR 的容错和恢复能力,但也增加了维护路由表及每个节点的状态表的开销,尤其在节点数目较大的时候。

1.4.2 SPEED 协议

这是一个实时路由协议。SPEED^[15]中的每个节点记录所有邻节点的位置信息和转发速度,并设定一个速度门限,当节点接收到一个数据包时,根据这个数据包的目的位置把相邻节点中距离目的位置比该节点近的所有节点划分为转发节点候选集合,然后把转发节点候选集合中转发速度高于速度门限的节点划分为转发节点集合,在这个集合中转发速度越高的节点被选为转发节点的几率越大。如果没有节点属于这个集合则利用反馈机制重新路由。该协议的优点是:在一定程度上实现了端到端的传输速率保证、网络拥塞控制以及负载均衡机制。其缺点是:路由的过程没有考虑在多条路径上传输以提高平均寿命,传输的报文没有优先级机制。

2 路由协议的对比分析

WSNs 是与应用高度相关的网络,每种路由协议都是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。

对文中阐述的协议的特点进行了比较,其结果如表 1 所示。这些协议的特点有:是否需要很高的能量,是否支持节点移动,是否提供位置感知,是否进行数据融合,是否提供局部定位,是否考虑 QoS 保证机制,是否保证网络的扩展性,是否提供多路径以及基于查询驱动的机制,是否提供安全机制。

由表 1 可以看出,安全特性是目前这些路由协议未曾考虑的,路由协议作为传感器网络组网的关键技术,其安全性关系到整个网络的安全与否,因此下一步的研究重点将在这方面。

表 1 无线传感器路由协议的分类和比较

	Classifi- cation	Power Required	Mobility	Position Awareness	Data Aggregation	Locali- zation	QoS	Scala- bility	Multi- path	Query- based	Security
Flooding& Gossiping	Data-center	High	Yes	No	No	No	No	Ltd.	Yes	No	No
SPIN	Data-center	Ltd.	Poss.	No	Yes	Yes	No	Ltd.	Yes	Yes	No
DD	Data-center	Ltd.	Ltd.	No	Yes	Yes	No	Ltd.	Yes	Yes	No
Rumor	Data-center	N/A	Very Ltd.	No	Yes	No	No	Good	No	Yes	No
LEACH	Hierarchical	High	Fixed BS	No	Yes	Yes	No	Good	No	No	No
TEEN	Hierarchical	High	Fixed BS	No	Yes	Yes	No	Good	No	No	No
TTDD	Hierarchical	Ltd.	Yes	Yes	No	No	No	Low	Poss.	Poss.	No
GAF	Location	Ltd.	Ltd.	No	No	No	No	Good	No	No	No
GEAR	Location	Ltd.	Ltd.	No	No	No	No	Ltd.	No	No	No
SAR	QoS	Ltd.	No	No	Yes	No	Yes	Ltd.	No	Yes	No
SPEED	QoS	N/A	No	No	No	No	Yes	Ltd.	No	Yes	No

3 总结和展望

近年来,路由协议成为无线传感器网络最重要的研究领域之一,已经有相当多的文献对此加以论述。通过对当前的各种路由协议的分析、比较与总结,可以看出 WSNs 路由协议设计应满足下面一些要求:

(1)能量高效。传感器网络路由协议不仅要选择能量消耗小的消息传输路径,而且要从整个网络的角度考虑,选择使整个网络能量均衡消耗的路由,提高网络生命周期。

(2)可扩展性。在无线传感器网络中,检测区域范围或节点密度不同,造成网络规模大小不同;节点失败、新节点加入以及节点移动等,都会使得网络拓扑结构动态发生变化,这就要求路由协议具有可扩展性。

(3)鲁棒性。能量用尽或环境因素造成传感器节点的失败,周围环境影响无线链路的通信质量以及无线链路本身的缺点等,这些无线传感器网络的不可靠特性要求路由协议具备一定的容错能力。

(4)快速收敛性。传感器网络的拓扑结构动态变化,节点能量和通信带宽等资源有限,因此要求路由协议能够快速收敛,以适应网络拓扑的动态变化,减少通信协议开销,提高消息传输的效率。

与此同时,无线传感器网络路由协议问题还存在这样一些挑战:由于采集图像和传播视频数据以及实时应用而提出的 QoS 和带宽的高效利用的问题;高效动态分簇的问题;节点的移动性问题以及在能量受限环境下节点移动性和拓扑变化带来的开销问题;安全问题将是传感器网络今后应用推广中的一个最大障碍,这些安全问题涉及传感器网络的具体应用、路由、定位、数据融合、密钥管理等多方面。考虑到节点自身计算能力弱、能量有限等特点,Internet 网络、MANET 所应用的那些复杂安全路由策略大都不适合传感器网络,因此如何构建一个弹性的安全路由策略将是今后一个重要的研究方向,也将是后续研究的重点;如何将传感器网络的路由协议和传统的 IP 路由协议无缝集成也是一个可能的研究方向。

参考文献:

- [1] 孙利民,李建中,陈渝,等.无线传感器网络[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [2] Al-Karaki J N, Kamal A E. Routing techniques in wireless sensor networks: a survey[J]. Wireless Communications, IEEE, 2004, 11: 6-28.
- [3] Qiangfeng J, Manivannan D. Routing protocols for sensor net-

works[DB/OL]. 2006-11-25. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/9037/28685/01286839.pdf?tp=&arnumber=1286839&isnumber=28685>.

- [4] 催莉,鞠海玲,苗勇,等.无线传感器网络研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2005(1): 163-174.
- [5] Hedetniemi S, Liestman A. A survey of gossiping and broadcasting in communication networks[J]. Networks, 1998, 18(4): 319-349.
- [6] Kulik J, Heinzelman W R, Balakrishnan H. Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks[J]. Wireless Networks, 2002, 8: 169-185.
- [7] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D. Directed diffusion for wireless sensor networking[J]. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2003, 11(1): 2-16.
- [8] Braginsky D, Estrin D. Rumor routing algorithm for sensor networks[J]. In the Proceeding of the First Workshop on Sensor Networks and Applications (WSNA). Atlanta, GA: [s. n.], 2002.
- [9] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-Efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C] // Proceedings of the 33rd Hawaii International Conf. on System Sciences. Maui, Hawaii: IEEE Computer Society, 2000: 3005-3014.
- [10] Manjeshwar A, Agarwal D P. TEEN: a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks[C] // Int'l Proc. of the 15th Parallel and Distributed Processing Symp. San Francisco: IEEE Computer Society, 2001: 2009-2015.
- [11] Ye F, Luo H, Cheng J, et al. A Two-Tier data dissemination model for large-scale wireless sensor networks[C] // Proceeding of the 8th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2002: 148-159.
- [12] Xu Y, Heidemann J, Estrin D. Geography-informed energy conservation for ad-hoc routing[J]. Proc. 7th Annual Int'l. Conf. on Mobile Computer and Network (MobiCOM). Rome, Italy: [s. n.], 2001: 70-84.
- [13] Yu Y, Estrin D, Govindan R. Geographical and energy-aware routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks[R]. [s. l.]: Computer Science Department, UCLA, 2001.
- [14] Sohrabi K, Pottie J. Protocols for self-organization of a wireless sensor network[J]. IEEE Pers Commun, 2000, 7(5): 16-27.
- [15] He T, Stankovic J A, Lu C, et al. SPEED: A stateless protocol for real-time communication in sensor network[J]. Proc 23rd Int'l. Conf Distributed. Comp. Sys. Providence, Rhode Island: [s. n.], 2003.