

传感器网络的路由机制^{*})

孙利民 叶 驰 廖 勇

(中科院软件研究所多媒体和网络研究中心 北京100080)

摘 要 微电子技术和无线技术的进步推动传感器网络的发展,传感器网络实现分布式监测任务,能够应用于各种领域。由于传统网络路由协议重点在于提供高的服务质量,不能适用于存在能量约束的传感器网络。本文在说明传感器特点的基础上,对传感器网络的路由机制进行了简单的分类,并详细介绍和分析已提出的主要路由机制。

关键词 传感器网络,路由机制,能量高效

Routing Mechanism in Sensor Networks

SUN Li-Min YE Chi LIAO Yong

(Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract Recent advancement in electronics and wireless communications has enabled the development of sensor networks, which perform distributed sensing task and can be used for various application areas. Traditional routing protocols can not be used for sensor networks because conventional protocols focus on providing high quality of service and not on limited energy supply. This paper makes a survey of recent works on routing mechanism for sensor networks. First the paper presents the characteristics of sensor networks. Then it classifies the main routing protocols proposed in the literature, describes and analyzes them in detail.

Keywords Sensors networks, Routing mechanism, Efficient energy

1 概述

微电子技术和无线通信技术的进步,推动低功耗低价格多功能传感器的快速发展,使得能够在微小体积内集成信息采集、处理和无线通信等功能。传感器网络(sensor network)就是由部署在观测环境附近的大量的微型廉价低功耗的传感器节点组成,通过无线通信方式形成一个多跳的无线网络系统。传感器网络的组成节点分为汇聚点(sink)和传感器节点(sensor node)。传感器节点数目往往巨大,分布在监测区域(sensor field)内,每个节点具有信息采集、数据处理和转发路由的功能。汇聚点个数通常很少,具有发布命令和收集数据的功能,还实现与互联网的连接。相对传统功能单一的传感器而言,传感器网络具有分布式处理带来的监测高精度、高容错

性、大覆盖区域、可远程监控等众多优点,成为近期国际上网络研究的重要热点之一。

传感器网络具有非常广泛的应用前景,由于其具有可快速部署、可自组织和高容错性的特点,因此非常适合在军事上应用,比如通过飞机将传感器节点撒播在战场上,对化学武器的使用、敌方车辆和士兵的运动进行及时监测和报告,美军已经多次在实弹军事演习中进行了类似的试验。传感器网络对于比较恶劣的环境和人不宜到达的场所非常适用,比如荒岛上的环境和生态监控,原始森林的防火和动物活动情况监测,污染区域以及地震和火灾等突发灾难现场的监控。传感器网络也可用于城市的交通监测,大型车间原材料和仓库货物进出情况的监测,以及机场、大型工业园区的安全监测。

下面在介绍传感器网络协议栈和特点的基础上,重点说

^{*}) 本文研究得到国家自然科学基金项目(No. 60373049)和国家863高科技发展计划项目(No. 2001AA112051)资助。孙利民 博士,研究员,主要研究方向为无线移动网络和宽带接入网。叶 驰 硕士生,主要研究方向为无线网络协议。廖 勇 硕士生,主要研究方向为无线网络协议。

参 考 文 献

- Case J, Fedor M, Schoffstall M, Davin J. A Simple Network Management Protocol (SNMP), RFC 1157, 1990
- ITU-T Rec. M. 3010, Principles for a Telecommunications Management Network (TMN), Study Group IV, 1996
- McCloghrie K, Rose M. Structure and Identification of Management Information for TCP/IP-based Internets, RFC1155, 1990
- CCITT Recommendation X. 720 (1992) | ISO/IEC 10165-1 (1992). Information Technology—Open System Interconnection—Structure of Management Information: Management Information Model
- CCITT Recommendation X. 722(1992)|ISO/IEC 10165-4(1992). Information Technology—Open System Interconnection—Structure of Management Information: Guidelines for the Definition Managed Objects
- 姜月秋,冯永新,王光兴. 基于卫星综合信息网的网络管理模型研究. 东北大学学报, 2003(1): 15~18
- 姜月秋,王光兴,等. 一种应用于卫星网络的管理协议 MNMP 原型的研究. 兵工学报, 已录用
- Gokhale A S, Schmidt D C. Measuring and Optimizing CORBA Latency and Scalability Over High-Speed Networks. IEEE Transactions on Computers [J], 1998, 47(4): 391~412
- Feeney L M, Ahlgren B, Westerlund A. Spontaneous Networking: AN Application-oriented Approach to Ad Hoc Networking. IEEE Communications Magazine [M], 2001, 39(6): 176~181
- Xylomenos G, Polyzos G. TCP Performance Issue over Wireless Links. IEEE Communications Magazine [M], 2001, 4: 52~58
- Banerjea A. Fault recovery for guaranteed performance communications connections. IEEE/ACM on Networking [J], 1999, 7(5): 653~668
- Duarte E, Nanya T. A Hierarchical Adaptive Distributed System-Level Diagnosis Algorithm. IEEE Transactions on computers [J], 1998, 47(1): 34~45

明和分析目前提出的传感器网络路由机制,并对路由机制进行了分类和总结。

2 传感器网络的协议框架和特点

2.1 协议框架

汇聚点和传感器节点使用的协议框架如图1所示,网络协议各层的功能如下:物理层提供简单但健壮的调制、发送和接收技术;数据链路层负责无线信道的使用控制,减少邻居节点广播引起的冲突;网络层实现数据的融合,路由经过处理的监测数据到汇聚点;如果传感器网络应用层需要,传输层协作维护数据流;基于监测任务,在应用层上开发和不同的应用层软件。与各层网络协议相关的管理平台有能量管理平台、移动管理平台和任务管理平台,能量管理平台管理传感器节点如何使用能量;移动管理平台检测和注册传感器节点的移动,维护到汇聚点的路由,使得传感器节点能够跟踪它的邻居;任务管理平台在一个给定的区域内平衡和调度监测任务。

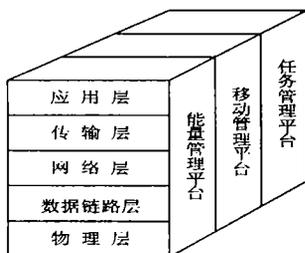


图1 传感器网络的协议框架

2.2 特点显著

传感器网络与仅作为通信介质的传统网络显著不同,它包括以下主要的特征:

- 传感器网络是以数据为中心(Data-Centric)的网络,相当于分布式的网络数据库,要查询的数据分布在所有或部分节点中。传感器网络中每个传感器节点具有端节点和路由器两者的作用,传感器节点接收汇聚点的查询或控制命令,实现信息的采集和处理功能;同时,处理和转发收到的来自其它节点的数据,实现路由的功能。由于传感器网络关注的是具有某种特性的数据,传感器节点数目巨大和节点放置的随机性,传感器节点没有必要采用IP地址,可以使用局部能够区分的标号标识。

- 邻居节点数据的相似性。传感器网络的相邻节点监测的可能是同一个事件如火灾,从不同监测点得到同一事件的相关数据,这样相邻节点的数据可能存在信息的冗余性,将这些数据进行融合可以有效地节省网络资源。

- 传感器网络是应用相关的网络。传统网络发展的趋势是电信网、计算机网以及电视网的逐步融合,而传感器网络是针对某个或某些应用而专门设计的。传感器网络中,在数据传输路径上的中间传感器节点需要针对应用情况,对收到其它节点转发来的数据以及本身采集的数据进行融合(aggregation)、缓存和转发。

2.3 能量高效

传感器网络最重要的特点是传感器节点通常携带不能补充的有限能量,这是传感器网络研究的基础点,就是要在完成给定任务的前提下,如何高效利用能量使得网络的生存期更长。在多数情况下,传感器网络汇聚点的数量很少,可以及时补充能量,而传感器节点数量巨大,携带非常有限的能量,而且无法补充,因此传感器网络的主要研究对象是在传感器节

点。传感器节点由传感器模块、处理模块、无线收发模块和能量供应模块四部分组成(如图2),传感器模块负责信息采集和数据转换;处理模块控制整个传感器节点的操作,处理本身采集的数据和其它节点发来的数据,运行网络协议;无线收发模块负责与其他传感器节点进行通信;能量供应模块为传感器节点提供运行所需的能量,通常是微型蓄电池。

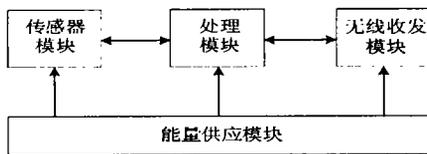


图2 传感器节点的体系结构

随着集成电路工艺的进步,处理器和传感器模块的功耗很低,绝大部分能量消耗在无线通信模块中。网络协议控制无线模块的操作,对无线模块的能量消耗具有关键性的作用,下面讨论网络协议中的路由机制。

3 路由机制

Ad hoc、无线局域网、蜂窝等传统无线网络的首要目标是提供高的服务质量和高效利用网络带宽,其次才考虑节约能量,而传感器网络的首要目标是高效使用能量,延长网络系统的生存期,因此,已有网络的路由协议不能用于传感器网络,传感器网络的路由机制通常与数据融合联系在一起,减少冗余信息的发送以节省能量。下面在简单分类的基础上,介绍目前国际上提出的具有代表性的传感器网络路由机制。

3.1 能量路由

能量路由基于节点的可用能量(PA, Power Available)或传输路径上链路的能量需求选择数据的发送路径。在图3所示网络中,链路旁的 a 表示在该链路上发送数据需要的能量,下面给出从源节点到汇聚点的路径:

路径1:源节点-B-A-汇聚点,路径上节点PA之和为4,发送需要的能量之和为3;

路径2:源节点-C-B-A-汇聚点,路径上节点PA之和为6,发送需要的能量之和为6;

路径3:源节点-D-汇聚点,路径上节点PA之和为3,发送需要的能量之和为4;

路径4:源节点-F-E-汇聚点,路径上节点PA之和为5,发送需要的能量之和为6。

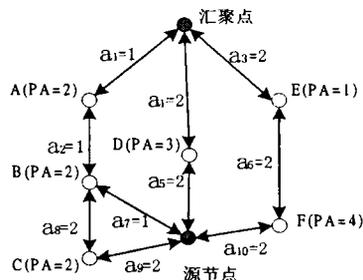


图3 能量路由算法的示例图

目前提出以下方法:

- 最大PA路由:选取从数据源到汇聚点所有路径中节点PA之和最大的路径。图3中路径2是最大的,但路径2包含了路径1,因不是高效的而被排除,选择路径4;

- 最小能量路由:选取从数据源到汇聚点所有路径中节点

耗能之和最少的路径,图3中为路径1;

·最少跳数路由:选取从数据源到汇聚点跳数最少的路径,图3中为路径3;

·最大最小PA节点路由:选取从数据源到汇聚点所有路径中包含最小节点PA最大的路径,图3中为路径3。

以上能量路由算法需要节点知道整个网络的全局信息,而传感器网络的能源约束使得节点只能获取局部信息,因此它们只是理想情况下的路由方法。

3.2 基于协商的路由 SPIN (Sensor Protocol for Information via Negotiation)

SPIN路由算法假设所有传感器节点都可能是希望获得数据的汇聚节点,每个传感器节点知道自己是否需要数据或在数据源到汇聚节点的路径上。SPIN路由是对传统洪泛(flooding)路由的改进,传感器节点在发送数据前先进行协商,仅把数据发送到需要的相邻节点,同时采用称为“元数据”(meta-data)描述符减少冗余信息。

SPIN协议使用ADV、REQ和DATA三种类型的消息(图4)。SPIN-1采用三次握手方式,当节点有新的数据时,广播ADV消息通告给它的所有邻居,其中包括DATA的描述符(Step 1);当邻居节点收到这个广播消息时,如果对这个数据感兴趣,先检查其是否已经有该数据,没有就发送REQ消息请求新的数据(Step 2);源节点在收到REQ消息后,发送数据给请求节点(Step 3)。这些邻居节点重复以上过程(Step 4, 5, 6),从而可以使网络中所有对这条数据感兴趣的传感器节点都能获得该数据。该协议的优点在于简单性,节点仅需要知道它的邻居节点,无需其它拓扑信息。

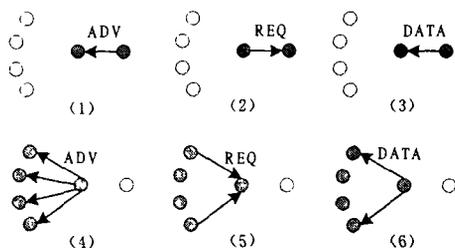


图4 SPIN协议的基本操作

SPIN-2是对SPIN-1的扩展,在协商中增加了基于能量阈值的资源感知机制。当节点能量接近能量阈值时,仅当执行协

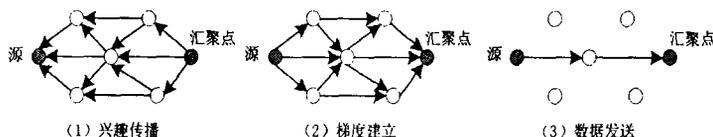


图5 定向扩散的基本操作

路径建立:汇聚点向网络中所有节点通过网络广播任务,任务用含有任务类型、数据发送速率、时间戳等参数的兴趣来描述。这些兴趣是探测性质的,要求节点发送数据速率比较低。每个节点缓存接收的兴趣,通过记录相应的发来兴趣的邻居节点、数据速率和时间戳等来建立梯度。随着兴趣在整个网络的传播,就建立了从数据源节点到汇聚点的数据传输梯度。

数据发送:当节点采集到匹配查询的数据时,通过梯度路径发向汇聚点。由于可能从多个邻居节点收到兴趣,(中间)节点向多个邻居节点发送数据,汇聚点(或中间节点)可能收到经过多个邻居节点的同数据,中间节点需要实现数据的融

议三个阶段后其能量不低于阈值时,才参与协议操作,但不影响节点接收数据。

3.3 基于层次的路由

(1) LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) 其核心思想是基于分簇的路由,它包括周期性的循环过程,每轮循环分为簇建立阶段和时间较长的稳定的数据通信阶段。在簇建立阶段,相邻节点动态地自动形成簇,随机地产生簇首。在数据通信阶段,簇内节点把数据发给簇首,簇首进行数据融合并把结果发送给汇聚点。由于簇首需要完成数据融合、与基站通信等工作,簇首的能量消耗非常高,各节点需要等概率地担任簇首,这样才能使网络中所有节点比较均衡地消耗能量,有利于延长整个网络的生存期。LEACH协议的特点是分层和数据融合,分层利于网络的扩展性,数据融合能够减少通信量。

(2) TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol) 此路由协议把传感器网络分为节点周期性发送信息的主动网络(proactive network)和及时监测突发事件的反应网络(reactive network)。在反应网络中,人们只对传感属性值高于给定阈值的数据感兴趣。TEEN协议是应用于反应网络的对LEACH协议的改进,其核心操作过程描述如下:在簇首选举以后,簇首会把绝对阈值和相对阈值两个参数广播给其它成员。传感器节点持续的采集数据,当采集的数据第一次大于绝对阈值,节点把数据记录下来,同时发送给簇首;在这个簇首周期的以后时间内,这个节点只有满足采集的数据大于绝对阈值,而且与前一次记录结果之差大于相对阈值时,才对数据进行记录并发送给簇首。

TEEN协议的改进操作有两个好处:第一,对于突发事件能够及时响应;第二,对于持续的突发事件,相邻两次数据之差在不大于阈值时,无需不断地发送数据,有效地减少通信流量。

3.4 基于查询的路由

(1) 定向扩散(Directed Diffusion) 是基于查询的按需路由,汇聚点发出查询消息,形成反向的从数据源到汇聚点的数据扩散梯度,数据沿着梯度传送到汇聚点。其中的数据采用(属性,值)方式进行命名,所有节点都是应用感知(application-aware),能够进行数据的融合。定向扩散包括周期性的以下基本操作过程(见图5)。

合。

增强路径:汇聚点在收到这些低速率数据后,向数据到达最快的邻居节点发送增强消息,增强消息表示汇聚点要求高速率发送数据。相应邻居节点按照同样的方式,依次传递增强信息给其邻居节点,直到到达数据源,这样将构建数据发送的主路径。数据以后就通过主路径发送给汇聚点。

(2) 谣传路由(rumor routing) 在传感器网络的有些应用中,仅有少量数据传输,或指示目标节点执行新的监测任务,洪泛每个查询消息获得优化路径并不是高效的办法。谣传路由为了克服类似定向扩散中洪泛查询消息开销大的问题,

其核心思想是源节点产生的代理随机路由形成到达源节点的事件路径,汇聚点的查询消息随机在网络中传送以发现相应的事件路径。谣传路由算法概括如下:

·每个节点都维护邻居列表和事件列表,当监测到一个事件发生时,将事件加入到事件列表中,并基于一定的概率产生一个代理。

·代理是具有 TTL 字段的分组,将携带的事件通告给其经过的每个节点,并把经过节点维护的事件加入其携带的事件列表中。代理在避免路径循环情况下在网络中随机转发,直到 TTL 值减少为零,这样会形成到达每个事件的一段路径。

·对于关于特定事件的查询,如果汇聚点知道到达事件的

路径,直接发送查询到事件源节点;如果不知道,随机选择邻居发送查询,这样查询消息随机在网络中转发直到 TTL 值为 0 或到达事件源节点。如果到达源节点,源节点通过事件路径发送到汇聚点。

3.5 多路径路由

(1)不相交多路径和缠绕多路径 不相交多路径是从源到汇聚点之间完全不相交的多条路径,缠绕多路径(braided multipath)是部分相交的多条路径。它们是在定向扩散路由机制的基础上提出的,基于局部信息进行计算,目的是维护多条可用路径来提高路由的可靠性。

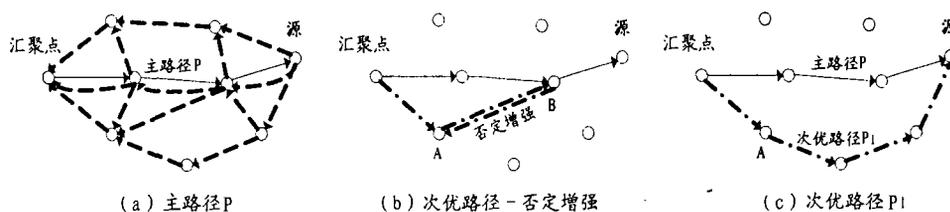


图6 局部不相交路径的构建

不相交多路径的建立过程(如图6):在汇聚点发送增强消息建立主路径后,汇聚点发送次优路径增强消息给次优节点 A,节点 A 选择最优节点 B 把次优路径增强信息传递下去。如果 B 在主路径上,则 B 发回否定增强消息给 A,A 向次优节点传递次优路径增强信息;如果 B 不在主路径上,则 B 继续传递次优路径增强信息,直到构造次优路径。如此可继续构造下一条次优路径。

缠绕多路径与主路径部分不相交,在建立主路径后,主路径上的每一个节点(除了源端和靠近源端的节点)都要发送备用路径增强消息给次优节点 A,次优节点寻找最优节点 B 传播该备用路径增强消息,如果 B 不在主路径上,继续向最优节点传播直到与主路径相交。

(2)能量感知路由(Rahul C. 等) 其目标是网络中各节点比较均衡地消耗能量,网络系统节点能量平稳降级,使得整个网络的生存期长。能量感知路由在源和目的之间建立多条路径,根据能量因素给每条路径赋予被选择使用的概率。在发送数据时,基于概率随机选择其中的一条路径,这使得没有一条路径一直在传送数据以防止能量的耗尽。能量感知路由分为三个阶段:

第一,建立阶段或兴趣传播阶段:通过洪泛路由发现从源到目的节点的所有路径和它们的能量信息,计算每条路径的选择概率,建立路由表;

第二,数据传播阶段:基于概率选择路径,转发从源到目的节点的数据;

第三,路由维护:通过不频繁地从目的到源节点的洪泛查询,维持所有路径的活动性。

结束语 由于传感器网络存在能量约束、处理能力有限和无线通信带宽窄等限制,传感器节点不能获得整个网络的拓扑信息,以及经过复杂的路由协议精确计算优化路由,而只能获得邻近节点的相关信息,在优化路由、处理和通信功耗,以及节点能量之间进行折衷,使得传感器网络具有长的生存期。传感器网络路由机制要求简单易实现,使用少量的节点资源;具有可扩展性,适用部署大量传感器节点的网路;适应传感器网络拓扑结构变化的特点;具有健壮性,考虑节点失效和环境变化的情况。传感器网络路由机制要充分考虑传感器网

络的特点,与数据融合技术相结合,其研究从最初的理想情况下的能量路由、基于协商的 SPIN 路由、定向扩散路由,到层次式的 LEACH 路由、TEEN 路由、多路径路由和能量感知路由等。传感器网络路由机制的首要设计目标是高效使用能源,不仅要考虑转发数据需要的总的能量,更要从整个网络系统的观点,考虑网络系统能量的均衡使用,延长整个网络的生存期。传感器网络是当前网络研究的新的热点之一,与各种应用相关的路由技术以及支持 QoS 的路由还需要进一步的研究和开发。

参考文献

- 1 Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramanian Y, Cayirci E. A Survey on Sensor Networks. IEEE Communications Magazine, 2002, 4: 102~114
- 2 Estrin D, Govindan R, Heidemann J, Kumar S. Next Century Challenges: Scalable Coordination in Sensor Networks. In: Proc. of ACM MobiCom '99, Seattle, WA, 1999. 97~104
- 3 Heinzelman W R, Kulik J, Balakrishnan H. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks. In: Proc. of ACM MobiCom '99, Seattle, WA, 1999. 174~185
- 4 Kulik J, Heinzelman W R, Balakrishnan H. Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks. Wireless Networks, 2002, 8: 169~185
- 5 Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In: Proc. of the 33rd Intl. Conf. on System Sciences (HICSS '00), Jan. 2000. 1~10
- 6 Heinzelman W R, Sinha A, Wang A, Chandrakasan A P. Energy-scalable algorithms and protocols for wireless microsensor networks. In: Proc. of Intl. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP'00), June 2000
- 7 Manjeshwar, Agarwal D P. TEEN: a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks. In: 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing, April 2001
- 8 Intanagonwiwat, Govindan R, Estrin D. Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In: Proc. of ACM MobiCom '00, Boston, MA, 2000. 56~67
- 9 Braginsky D, Estrin D. Rumor Routing Algorithm for Sensor Networks. In: Intl. Conf. on Distributed Computing System (ICDCS-2002), Nov. 2002
- 10 Shah R C, Rabaey J. Energy Aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Orlando, FL, 2002
- 11 Ganesan D, Govindan R, Shenker S, Estrin D. Highly-resilient, energy-efficient multipath routing in wireless sensor networks. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2001, 5(4): 10~24