

无线传感器网络路由协议的分析与比较

赵强利 蒋艳凰 徐 明

(国防科技大学计算机学院 长沙 410073)

摘 要 无线传感器网络的路由协议设计与传统的无线 ad-hoc 网络有很多不同,资源高度受限和结点失效频繁是其面临的两大挑战,相关技术研究已经成为无线传感器网络研究中的热点。对近年来无线传感器网络路由协议的研究成果进行归纳、分析和比较,介绍了无线传感器网络的特点以及影响其路由协议设计的关键因素。根据协议的实现特点将无线传感器网络路由协议分为 5 类,对每一类涉及的重要协议进行详细阐述与分析,最后对这些协议的特点进行归纳和比较,并展望了未来这一研究方向的发展趋势。

关键词 无线传感器网络, ad hoc 网络, 传感结点, 汇聚结点, 路由协议, 能源有效性

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Analysis and Comparison of Routing Protocols for Wireless Sensor Networks

ZHAO Qiang-li JIANG Yan-huang XU Ming

(School of Computer Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Design of routing protocols for wireless sensor networks becomes a hot research direction nowadays. There are many differences between the wireless sensor networks and the traditional ad hoc networks, the challenge of resource limitation and frequent node failure led to many routing protocols for wireless sensor networks. The paper introduced the components of wireless sensor networks and the key factors influencing the routing protocol design firstly. Then divided the routing protocols into five categories, analyzed the routing protocols belongs to each of them respectively, and compared the characteristics of these protocols. The paper concludes with current research trends.

Keywords Wireless sensor networks (WSN), Ad hoc network, Sensor node, Sink node, Routing protocol, Energy efficiency

1 引言

随着传感器技术和无线通信技术的不断发展,无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)备受人们的关注。无线传感器网络是由一组传感器结点通过无线介质连接构成的无线网络,它采用 ad hoc 方式配置大量微型的智能传感结点,通过结点间的协同工作来采集和处理网络覆盖区域中的目标信息。无线传感器网络在军事监控、环境监测、地震与气候预测、抢险救灾、地下、深水以及外层空间探索等许多方面都具有广泛的应用前景。

无线传感器网络中结点的能量资源、计算能力和带宽都非常有限,使得无线传感器网络的路由协议设计与传统的移动自组织网络(mobile ad hoc networks, 简称 MANET)有很大不同。无线传感器网络路由设计的重要目标是降低结点能源损耗,提高网络生命周期;而传统 MANET 路由协议设计的首要任务是提供移动条件下高质量的服务。由于设计目标的不同,导致了 MANET 路由协议不能直接应用于无线传感器网络中。

近年来,WSN 路由协议的研究一直是无线传感器网络研

究的热点^[1,2]。本文总结了目前较为重要的 WSN 路由协议,根据这些协议的实现特点,将它们分为 5 类:泛洪式路由协议、层次式路由协议、以数据为中心的路由协议、基于位置信息的路由协议和基于 QoS 的路由协议,然后针对每一类分别介绍当前最为典型的路由协议。

本文第 2 节介绍了无线传感器网络的结构以及影响其路由协议设计的关键因素;第 3 节对现有 WSN 路由协议进行分类,针对每一类别分别介绍典型的路由协议;第 4 节对所介绍的路由协议进行比较分析;最后总结全文。

2 WSN 路由协议的设计要求

2.1 无线传感器网络结构及特点

微机电系统和低功耗、高集成数字设备的发展,导致了低成本、低功耗、微体积传感结点的出现。这种微传感结点由传感单元、数据处理单元、通信单元和便携式电源组成,能完成数据采集、信号监测和传送信息的任务。

无线传感器网络^[3,4]由部署在监测区域内大量廉价的微型传感器结点组成,通过无线通信的方式形成一个自组织的网络系统,其目的是相互协作地感知、采集和处理网络覆盖区

到稿日期:2008-03-20 本课题得到国家自然科学基金资助(项目编号:60773017)。

赵强利(1973-),男,博士研究生,研究方向为移动计算、信息安全, E-mail: zhao-qiangli@163.com; 蒋艳凰(1976-),女,讲师,研究方向为高性能计算、机器学习; 徐 明(1963-),男,教授,博士生导师,主要研究领域为移动计算、计算机体系结构。

域中监测对象的信息。无线传感器网络结构如图 1 所示,大量的传感结点(sensor node)散布在监测区域内,负责采集与监测对象相关的数据,并将其协同处理后的数据传送到汇聚结点(sink node),汇集结点通过 Internet 或通信卫星将信息传输到任务管理结点(manage node)。无线传感器网络中的每一个传感结点兼顾着传统网络结点的终端和路由器功能,除了完成本地消息的收集和数据处理外,还要对其它结点转发来的数据进行存储、管理和融合等,同时与其它结点协作完成一些特定任务。

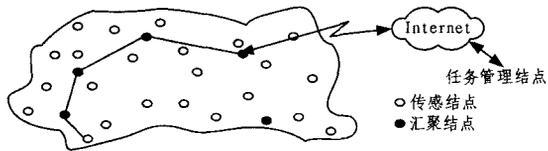


图 1 无线传感器网络结构

与传统无线 MANET 网络相比,无线传感器网络有着许多不同的特点。

(1)资源局限强:传感结点的资源限制很大,发送功耗、板上能源、处理能力、通信带宽和存储容量都局限在很低的范围内;

(2)无全局标识:传感结点数量庞大,如果维护全局标识则需要大量的开销,因此与传统基于 IP 的路由协议不同,在传感器网络中一般不采用全局标识;

(3)多对一通信:不同于传统网络的点对点通信,在传感器网络中几乎所有的应用都要求多个源传感结点将获取的数据传送至特定的汇聚结点;

(4)数据冗余大:多个源传感结点在许多场景下都有可能获得大量相似的数据,因此传感器网络的冗余数据量大。

由于无线传感器网络和传统的 MANET 存在许多的不同之处,使得它们的路由协议的设计目标和实现方法均不相同,因此 MANET 路由协议不能直接用于无线传感器网络中。

2.2 WSN 路由协议设计的关键因素

无线传感器网络面临的主要技术挑战是:在结点的能量资源、计算能力、存储空间和通信能力均高度受限的条件下完成感知、通信和控制功能。为此,无线传感器网络路由协议设计的主要目标是:建立能源有效性路径、形成可靠的数据转发机制、实现网络生命周期最大化。无线传感器网络结构存在着下列影响其路由协议设计的关键因素。

(1)网络动态:大部分网络体系结构都假设传感结点是静态的,而汇聚结点是可移动的。监测对象是移动还是静止则取决于具体应用。例如,在军事目标跟踪的应用中,监测对象是动态移动的;在森林火灾预防的应用中,监测对象是静止的。

(2)网络拓扑:分为固定和自组织两种拓扑配置方式。在拓扑固定的情况下,手动配置传感结点,数据通过预先设定的路径传输;在自组织拓扑的情况下,结点以 ad hoc 方式随机散布。

(3)数据发送模式:根据不同的应用需求,可将数据发送模式分为连续模式、事件驱动模式、请求驱动模式和混合模式。连续模式是传感结点按预定时间间隔周期性地发送数据;事件驱动和请求驱动模式则由汇聚结点产生相应的事件

或请求触发数据的传输;混合模式是上述模式的组合。

(4)结点类型:通常所有的传感结点都是同构的。如果具体应用中需要不同功能的传感器,则存在异构的传感结点。近来还有人提出采用特殊的能源局限性弱的结点来兼具转发、传感和聚集数据 3 种功能的传感结点。

(5)路径选择:存在多跳和单跳两种选择方式。无线射频的发送能量与距离的平方成正比,由于多跳路径的能源消耗比单跳路径少,故多采用多跳路径。但是多跳路径的拓扑管理和链路连接开销大,在传感结点与汇集结点间距离较短的情况下,单跳路径反而更有效。

由于 WSN 具有与应用高度相关的特点,故 WSN 路由协议同样具有多样性的特点,往往难以直接评价哪个协议更为优越。一般而言,评价一个无线传感器网络的路由协议设计是否成功,往往需要考虑如下指标。

(1)能源有效性/生命周期:能源有效性是传感器网络设计中需考虑的最为重要的因素。尽可能降低能源消耗,从而延长网络生命周期,是 WSN 路由协议设计的首要目标。

(2)可靠性/容错性:传感结点容易因为能源耗尽或环境干扰而失效,部分传感结点的失效不应影响整个网络的任务。

(3)可扩展性:在一些应用中可能需要成百上千个传感结点,路由设计应能满足大量结点协同工作。

(4)延迟:传感器网络的延迟时间是指观察者发出请求到收到应答信息所需的时间,设计路由协议时必须尽可能减少延迟。

3 WSN 路由协议分析

3.1 WSN 路由协议分类

无线传感器网络路由协议负责在传感结点和汇聚结点间可靠地传输数据。由于无线传感器网络与应用高度相关,单一的路由协议不能满足各种应用需求。针对不同应用的特点,人们研究了众多的路由协议。这些路由协议可以大致分为 5 类:泛洪式路由协议、层次式路由协议、以数据为中心的路由协议、基于位置信息的路由协议、基于 QoS 的路由协议。

(1)泛洪式路由协议:这是一种古老的路由协议,它不需要维护网络的拓扑结构和路由计算,接收到消息的结点直接将数据包转发给相邻结点。对于自组织的传感器网络,泛洪式路由是一种较直接的实现方法,但容易带来消息的“内爆”和“重叠”,而且它没有考虑能源方面的限制,存在“资源盲点”的缺陷。

(2)层次式路由协议:这种协议的基本思想是将传感结点分簇,簇内通信由簇头结点来完成。簇头结点进行数据聚集和融合以减少传输的信息量,最后簇头结点把融合的数据传送给汇聚结点。这种方式能满足传感器网络的可扩展性,有效地维持传感结点的能量消耗,从而延长网络生命周期。

(3)以数据为中心的路由协议:这种协议对传感器网络中的数据用特定的描述方式命名,数据传送基于数据请求并依赖数据命名,所有的数据通信都限制在局部范围内。这种方式的通信不再依赖特定的结点,而是依赖于网络中的数据,从而减少了网络中大量传送的重复冗余数据,降低了不必要的开销,从而延长网络生命周期。

(4)基于位置信息的路由协议:它利用结点的位置信息,把请求或数据转发给需要的区域,从而缩减数据的传送范围。

实际上许多传感器网络的路由协议都假设结点的位置信息是已知的,所以可以方便地利用结点的位置信息将结点分为不同的域(Region)。基于域进行数据传送能缩减传送范围,减少中间结点的通信量,从而延长网络生命周期。

(5)基于 QoS 的路由协议:能量感知的 QoS 路由需要保证整个连接时间内的带宽(或延时)和对能量高效路径的有效利用。基于 QoS 的路由协议适用于军事目标实时追踪以及紧急事件监视等实时性强的应用。

3.2 泛洪式路由协议

3.2.1 Flooding 协议

Flooding 是一种古老、传统的泛洪式路由技术,它不需要维护网络的拓扑结构,也不需要进行路由计算,接收到消息的结点以广播形式转发数据包给所有相邻结点。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步数。

虽然 Flooding 协议思想简单,易于实现,但是存在消息内爆、消息重叠、资源盲点的缺陷。消息内爆是指相同的消息经过不同中间路径发送到同一个结点。如图 2 所示,结点 D 收到两份由结点 A 发出的消息。消息重叠指的是放置在同一区域内的结点监测到相同的信息,然后产生相似的数据包发送给相同的邻居结点。如图 3 所示,结点 C 从结点 A 和结点 B 处都收到了关于 r 的信息。资源盲点是指消耗了大量能量却没有考虑能量使用的限制。

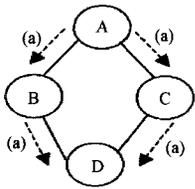


图 2 Flooding 协议的消息内爆问题

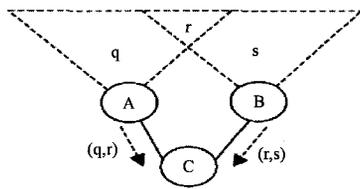


图 3 Flooding 协议的消息重叠问题

3.3 层次式路由协议

3.3.1 LEACH 协议

LEACH(Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)协议^[6]是第一个在无线传感器网络中提出层次式路由的协议,其后的大部分层次式路由协议都是在它的基础上发展而来的。

该协议的主要思想是通过随机选择簇头(cluster head)结点,平均分担无线传感器网络的中继通信业务来达到平均消耗传感器网络中结点能量的目的,进而可以延长网络的生命周期。LEACH 协议分为两个阶段:聚簇(cluster)准备阶段和数据传输阶段。这两个阶段所持续的时间总和称为一个轮回。

在聚簇准备阶段,随机选择结点为簇头。成为簇头的结点向周围广播信息,其它结点根据接收到广播信息的强度来选择它所加入的聚簇,并告知相应的簇头。簇头直接与汇聚结点通信,而聚簇成员只能与所属聚簇中的簇头通信。簇头的建立过程是:从结点 0 到 1 的随机数中任意选择一个数值,若当前轮回中这个数值小于设定的阈值 $T(n)$,则该结点成为簇头结点, $T(n)$ 的计算公式如下:

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

其中 p 为期望的簇头结点在所有传感结点中的百分比, r 是当前轮数, G 是在最后的 $1/p$ 轮中未成为簇头结点的结点集。

在数据传输阶段,结点持续采集监测数据,并传送到簇头,由簇头对数据进行必要的融合处理之后,发送到汇聚结点。下一轮工作周期重新选择簇头。

LEACH 协议通过随机选择簇头确保簇头与汇聚结点之间数据传输的高能耗成本均匀地分摊到所有传感结点上,使得因能量耗尽而失效的结点呈随机分布状态,因而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%。但是 LEACH 假设所有的结点都能直接与簇头结点和汇聚结点通信,采用连续数据发送模式和单跳路径选择模式,因此不适用于监测范围大的应用,而且动态分簇带来了拓扑变换和大量广播这样的额外开销。

3.3.2 TEEN 协议

TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol)协议^[7]采用与 LEACH 协议相同的聚簇方式,但簇头结点根据它们与汇聚结点的距离形成层次结构。TEEN 协议对传感属性的急剧变化产生相应的反应,这一特性对实时环境下网络采用交互式模式进行操作的情况十分有用。对于每一个传感属性,TEEN 协议均定义了硬、软两个门限来确定是否需要发送该属性的数据。只有满足如下两个条件的时候才能发送数据:(1)当前数据的属性值大于硬门限;(2)当前数据的属性值与上一次发送的属性值之间的差距大于软门限。

TEEN 协议采用数据中心的方式形成聚簇,相邻的传感结点形成一个聚簇。这一过程不断持续,直到到达汇聚结点。图 5 表示出 TEEN 协议生成聚簇后的层次结构。当聚簇形成后,簇头结点广播软硬门限。因为用户大多数情况下不需要所有的数据,所以周期性地传输数据是不必要的,因此 TEEN 协议比 LEACH 协议节省了许多的数据传输开销。

3.2.2 Gossiping 协议

Gossiping 协议^[5]是对 Flooding 协议的改进,发送数据的结点不是采用广播方式传送数据,而是随机选取一个相邻结点转发数据。

Gossiping 协议可以避免消息内爆现象,节约了能量,但是仍然无法解决部分重叠现象和盲目使用资源问题,而且有可能增加端到端的传输延时。图 4 给出 Gossiping 协议存在延时问题的一个简单示例,结点 F 需要结点 A 产生的数据,

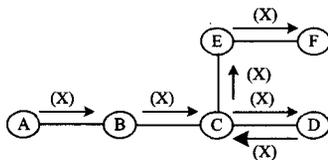


图 4 Gossiping 协议的延时问题

在传输过程中,如果结点 C 随机选择邻居结点 D 转发数据副本(X),由于 C 是 D 的唯一邻居,D 又将数据副本发回它的邻居结点 C,C 再转发给 E,最终结点 F 收到数据。这样,结点 C 不仅两次收到(X)的数据副本,而且使得传输路径 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow F$ 延长为 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow F$,增加了传输延时。

TEEN 协议的缺点是:如果数据的属性值一直达不到门限,结点不会发送数据,用户将接收不到网络的任何数据,并且不能得知所有结点是否死亡。

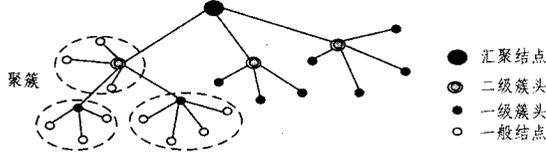


图 5 TEEN 协议的层次结构

3.3.3 PEGASIS 协议

PEGASIS(Power-efficient GATHERing in Sensor Information Systems)协议^[8]是在 LEACH 协议的基础上建立起来的。为避免频繁选择簇头引起大量的通信开销,PEGASIS 协议中结点只同距它最近的相邻结点通信,而且所有结点形成一个聚簇,每一轮只选一个结点作为簇头。

在 PEGASIS 协议中,首先采用贪婪算法构造一条“链”,即各结点发送能量递减的测试信号获取距离自己最近的相邻结点,从而建立一条包含网络中所有结点的“链”,如图 6(a)所示。然后动态选择簇头,假设网络中 N 个结点都用 $1-N$ 的自然数编号,第 j 轮选取的簇头是第 i 个结点,则满足 $i=j \bmod N$ (i 为 0 时取值为 N),簇头与汇聚结点一跳通信。

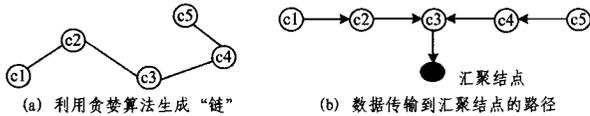


图 6 PEGASIS 协议的链式结构

当簇头选定后,链两端的结点向链中的下一个结点发送数据,接收到数据的结点将自己的数据和接收到的数据融合,然后将融合的数据发送到下一个结点。如此一直到簇头,簇头结点把接收到的两组数据和自己的数据融合后形成一个数据包发送给汇聚结点,如图 6(b)所示(其中 c_3 为簇头)。如果距离接收器结点较远的结点充当簇头,该结点与汇聚结点之间的通信开销过大,会导致这个结点过早死亡,所以 PEGASIS 设置了一个距离阈值。如果结点到汇聚结点的距离超过这个阈值,该结点不能成为簇头。当链两端数据都传输完成时,开始新一轮选择与传输。

PEGASIS 协议避免了 LEACH 协议中频繁选择簇头带来大量通信开销的问题,而且协议提供了有效的链式数据聚合,极大地减少了数据传输次数和通信量;结点总是与距离最近的相邻结点通信,形成多跳通信方式,有效地降低了能量,大幅度提高了网络生存时间。仿真结果表明,对于不同的应用和网络拓扑结构,与 LEACH 协议相比,采用 PEGASIS 协议的传感器网络生命周期能够提高 $1\sim 3$ 倍。PEGASIS 协议的缺点是:单簇方法使得簇头成为关键点,其失效会导致路由失败;要求传感结点都具有与汇聚结点通信的能力;如果链过长,数据传输延时将会增大,不适合实时应用;成链算法要求各结点知道其它结点位置,开销非常大。

3.4 以数据为中心的路由协议

3.4.1 SPIN 协议

SPIN(Sensor Protocols for Information via Negotiation)协议^[9]是最早以数据为中心的路由协议,它通过协商机制来

解决算法中的“内爆”和“重叠”问题。SPIN 协议中结点利用 3 种消息进行通信:ADV (数据描述)、REQ (数据请求)和 DATA (数据)。结点产生或收到数据后,为避免盲目传播,用包含元数据的 ADV 消息向相邻结点通告,需要数据的相邻结点用 REQ 消息提出请求,数据通过 DATA 消息发送到请求结点。

图 7 表示了 SPIN 协议的路由建立与数据传输。图 7(a)中结点 A 告知结点 B 它拥有的数据描述;图 7(b)中结点 B 向结点 A 发送请求;图 7(c)中结点 A 将数据传送给结点 B;图 7(d)表示结点 B 收到消息,并给其相邻结点发送 ADV 消息;图 7(e)表示需要该数据的结点给结点 B 发送 REQ 消息;图 7(f)表示结点 B 将数据传送给请求结点。

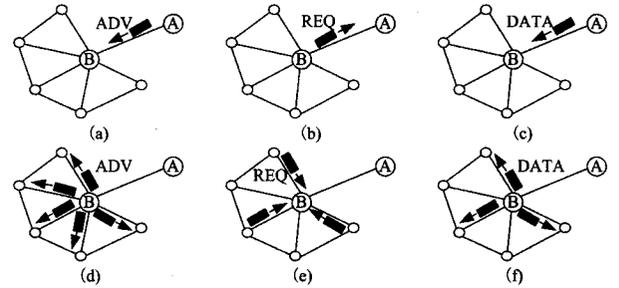


图 7 SPIN 协议的路由建立与数据传输

SPIN 协议的优点是:小的 ADV 消息减轻了内爆问题;通过数据命名解决了消息重叠问题;结点根据自身资源和应用信息决定是否进行 ADV 通告,避免了资源盲目利用问题。与 Flooding 和 Gossiping 协议相比,SPIN 协议有效地节约了能量。SPIN 协议的缺点是:当产生或收到数据的结点的所有相邻结点都不需要该数据时,将导致数据不能继续转发,可能出现较远结点无法得到想要数据;当某汇聚结点对任何数据都需要时,其周围结点的能量容易耗尽;SPIN 协议虽然减轻了数据内爆,但在较大规模网络中,ADV 内爆仍然存在。

3.4.2 Directed Diffusion 协议

Directed Diffusion 协议^[10]是以数据为中心的路由协议发展过程的里程碑,其它以数据为中心的路由协议都是基于该协议的改进或者采用类似的关键思想来提出的。Directed Diffusion 算法的主要思想是对网络中的数据用一组属性命名,并基于数据进行通信。Directed Diffusion 采用请求驱动的数据传送模式。当汇聚结点对某事件发出请求命令时就开始一个新的定向扩散过程,该过程包括请求扩散、初始梯度建立和数据传输 3 个阶段,如图 8 所示。

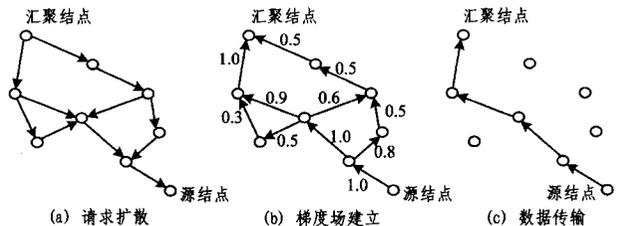


图 8 Directed Diffusion 协议的三个阶段

在请求扩散阶段,汇聚结点采用和目标数据相似的一组属性来命名它发出的请求信息。数据属性的描述为(对象的名称、数据发送间隔时间、持续时间、位置区域);然后将请求信息通过广播逐级扩散。收到请求信息的结点缓存信息,并

进行局部数据聚集,最终请求信息遍历全网,找到所有匹配的目标数据。

初始梯度建立阶段实际上和请求扩散阶段是同时进行的。当结点从相邻结点接收到请求信息后,若当前请求缓存中没有相同的请求记录,则加入新记录,记录中包含了相邻结点指定的数据发送率,也就是“梯度”。

在数据传输阶段时,汇聚结点会对最先收到新数据的相邻结点发送一个加强选择信息(发送具有更大的“梯度”的请求信息)。收到加强选择的相邻结点同样加强选择它最先收到新数据的相邻结点,将这个带更大“梯度”值的请求信息进行扩散,最后会形成一条“梯度”值最大的路径。目标数据能沿这条加强路径以较高的数据发送率来传送数据,而其它数据发送率停留在较低水平的结点组成的路径可以作为备选路径以增加网络可靠性。

Directed Diffusion 采用相邻结点间通信的方式来避免维护全局拓扑,采用请求驱动的数据传送模式和局部数据聚集而减少网络数据流量,因此它是一种高能源有效性的协议。该协议的缺点是,在需要连续数据传送的应用中(如环境监测等)使用效果不佳;数据命名只能针对特定的应用预先进行;初始请求的扩散开销大。

3.4.3 Rumor 协议

Rumor 协议^[11]是针对不知道结点位置信息的情况下对 Directed Diffusion 协议的一种改进。对于这种情况,Directed Diffusion 协议无法定向任务,需要在整个网络内广播请求信息。如果请求的数据量很小,广播请求消耗了很多能量。另一种处理方式是如果事件消息小,而询问消息较大,则直接广播事件,而不是广播询问消息。Rumor 协议结合了这两种处理方式。

Rumor 协议借鉴了欧氏平面图上任意两条曲线交叉几率很大的思想。当结点监测到事件后将其保存,并创建称为 Agent 的数据包。该数据包的生命周期较长,包括事件和源结点信息。然后将 Agent 按一条或多条随机路径在网络中转发,收到 Agent 的结点根据事件和源结点信息建立反向路径,并将 Agent 随机发送到相邻结点,且发送前可在 Agent 中增加其已知的事件信息,Agent 的转发形成事件路径。汇聚结点的查询请求也沿着一条随机路径转发,当它与事件路径交叉时,则路由建立;如不交叉,汇聚结点可以广播查询请求。图 9 给出了一种查询路径和事件路径相交的情况^[3]。

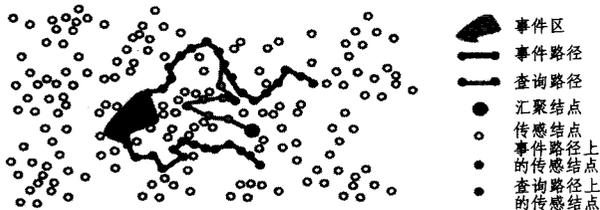


图 9 Rumor 协议的思想

在汇聚结点多、查询请求数目很大、网络事件很少的情况下,Rumor 协议较为有效。但如果事件非常多,维护事件表和收发 Agent 带来的开销会很大。

3.5 基于位置信息的路由协议

3.5.1 GPSR 协议

GPSR(Greedy Perimeter Stateless Routing)协议^[12]是一

个典型的基于位置的路由协议。GPSR 协议假设网络结点都知道自身的地理位置,且对位置进行了统一编址,各结点利用贪婪算法尽量沿直线转发数据,产生或收到数据的结点向以欧氏距离计算最靠近目的结点的相邻结点转发数据。

由于数据会到达没有比当前结点更接近目的结点的区域,即出现了空洞(hole),导致数据无法传输。当出现这种情况时,GPSR 协议利用平面图解决空洞问题,即数据包沿着平面图的周长来发现路由。当空洞周围的结点探测到出现空洞,就利用右手法则沿空洞周围传输数据来解决此问题。

GPSR 协议的优点是避免了在结点中建立、维护、存储路由表,只依赖直接相邻的结点进行路由选择,几乎是一个无状态的协议;使用接近于最短欧氏距离的路由,数据传输时延小;只要网络连通性不被破坏,一定能够发现可达路由。GPSR 协议的缺点是,当网络中汇聚结点和源结点分别集中在两个区域时,由于通信量不平衡,易导致部分结点失效,从而破坏网络的连通性;该协议需要 GPS 定位系统或其它定位方法协助计算结点位置信息。

3.5.2 GEAR 协议

GEAR(Geographic and Energy-Aware Routing)协议^[13]是一种充分考虑了能源有效性的基于位置的路由协议,该协议的思想是:既然传感器网络中的数据经常包含了位置属性的信息,那么可以利用这一信息,把在整个网络中扩散的信息传送到适当的位置区域中。GEAR 协议采用了请求驱动的数据传送模式,它传送数据的过程包括两个阶段:目标域数据传送和域内数据传送。

在目标域数据传送阶段,当结点接收到一个数据包,它就检查自己的相邻结点。如果有相邻结点比自己离目标域的距离更近,则选择与目标域距离最短的相邻结点作为下一跳结点;若不存在更小距离,出现了空洞现象,则根据开销函数选择开销最小的邻居作为下一跳结点。开销函数与结点能量和结点距离目的结点的距离相关。

在域内数据传送阶段,可通过两种方式让数据在域内扩散:一是在域内直接泛洪;二是和区域递归传送,直到区域内剩下唯一的结点。图 10 给出了区域递归传送的示例,数据传输到目标域后,将该区域分成 4 个子区域,每个子区域获得一个数据副本,然后对每个子区域递归进行区域传送。显然,对于传感结点密集度高的网络,采用区域递归的传送方式,其能量有效性优于目标域直接泛洪。

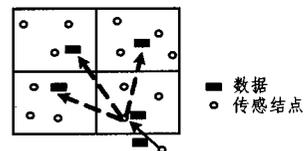


图 10 GEAR 中递归的目标域数据传送

GEAR 将网络中扩散的信息局限到适当的位置区域中,减少了中间结点的数量,降低了路由建立和数据传送的能源开销,从而有效提高了网络的生命周期。该协议的缺点是依赖结点的 GPS 定位信息,成本较高。

3.6 基于 QoS 的路由协议

3.6.1 SAR 协议

SAR(Sequential Assignment Routing)协议^[14]是第一个在无线传感器网络中保证 QoS 的路由协议。为了提高能量

有效性,并具有容错能力,它提供了一种表驱动的多路径路由。在该协议中,汇聚结点的所有一跳相邻结点都以自己为根创建生成树。在创建生成树的过程中考虑能量资源、数据包的优先级,以及结点的延时、丢包率等 QoS 参数。生成树创建完成后,一个传感结点可能属于多个树,从而反向建立了到汇聚结点的具有不同 QoS 参数的多条路径。结点发送数据时,根据能量资源与 QoS 选择一条或多条路径进行传输。任何本地错误都会在本地图自动引发路径重建过程,通过强制每条路径上各结点路由表的一致性而实现错误恢复。

SAR 协议维护从传感结点到汇聚结点的多条路径,不仅能够提供 QoS 保证,而且具有容错性,出错易恢复。但缺点是结点中的大量冗余路由信息耗费了存储资源,且路由信息维护、结点 QoS 参数与能耗信息的更新均需较大开销。

3.6.2 SPEED 协议

SPEED 协议^[15]是一种提供端到端软实时保证,并具有一定拥塞控制功能的 QoS 协议。该协议保证网络上的数据包以一定的速率传输,从而根据传感结点到汇聚结点的距离和数据包的传输速率,能够估计出数据包的端到端传输延迟。

SPEED 协议中每个结点记录所有相邻结点的地理位置信息和转发速度,并设定一个速度门限。当结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结点中距离目的位置比当前结点近的所有结点划分为转发结点候选集合,然后把转发结点候选集合中转发速度高于速度门限的结点划分为转发结点集合,在这个集合中转发速度越高的结点被选为转发结点的可能性越大。如果没有结点属于这个集合,则利用反馈机制重新路由。这样就保证传输的实时性,避免了拥塞。同时,因为传输延时越小的区域传输负荷越小,这样就平衡了整个网络的传输负荷,从而分摊了每个结点的能量消耗。

4 WSN 路由协议的特点比较

本节从生命周期、可扩展性、路径选择(单跳还是多跳)、能量感知、数据聚集、位置信息(是否需要结点的地理位置信息)、信息存储、可移动的结点、实时性、可靠性(容错能力)这些方面比较无线传感器网络路由协议的性能、特点。表 1 给出了前面介绍的各种路由协议的比较结果(其中 DD 表示 Directed Diffusion 协议)。由于无线传感器网络路由协议的设计与应用密切相关,在实际应用中到底选择哪一种路由协议,要根据具体应用和各路由协议的特点进行综合考虑。

表 1 无线传感器路由协议的特点比较

算法	生命 周期	可扩 展性	路径 选择	能量 感知	数据 聚集	位置 信息	信息 存储	可移动 的结点	实时 性	可靠 性
Flooding	短	差	多跳	无	无	无需	无	传感结点 汇聚结点	差	较好
Gossiping	较长	差	多跳	无	无	无需	无	传感结点 汇聚结点	差	较好
LEACH	较长	差	单跳	有	有	无需	有	无	差	较好
TEEN	长	好	多跳	有	有	无需	有	无	好	差
PEGASIS	长	差	多跳	有	有	无需	有	无	差	差
SPIN	长	差	多跳	无	有	无需	无	传感结点 汇聚结点	差	差
DD	长	好	多跳	有	有	无需	有	无	差	好
Rumor	长	好	多跳	有	有	无需	有	汇聚结点	差	较好
GPSR	较长	好	多跳	无	无	需要	无	传感结点	差	较好
GEAR	长	好	多跳	有	无	需要	无	传感结点	差	较好
SAR	较长	差	多跳	有	无	无需	有	无	好	好
SPEED	长	差	多跳	有	无	需要	有	无	好	好

结束语 与传统有线网络和无线 MANET 网络相比,无线传感器网络存在资源高度受限、结点易失效等特点,使得其路由协议的设计面临新的挑战。本文对近年来无线传感器网络路由协议的研究成果进行总结分析,将它们分为泛洪式路由协议、层次式路由协议、以数据为中心的路由协议、基于位置信息的路由协议和基于 QoS 的路由协议,针对每一类进行相应的算法分析,最后对这些协议的特点进行归纳比较。

随着应用的不断发展,无线传感器网络路由协议还存在着许多问题有待深入研究,主要体现在以下几点。

- 能源有效性:在无线传感器网络中,频繁的数据通信十分消耗能量,减少数据通信量,抑制结点上传输不必要的的数据,提高能源有效性是 WSN 路由协议设计首要考虑的问题。

- 可靠性:无线传感器网络的结点容易失效。如何利用结点易获得的网络信息计算路由,确保在路由出现故障时能够尽快得到恢复,以及如何进行数据的高可靠传输,是路由协议设计需解决的关键问题。

- 实时性:在不久的将来,实时传输图像、视频将成为无线传感器网络极其普遍的应用需求。研究设计传输质量高、传输延迟小、满足实时性需求的路由协议具有广阔的应用前景。

- 安全性:无线传感器网络的固有特性使得其路由协议极易受到安全威胁^[16]。对于秘级很高的应用领域,如军事应用,对路由协议的安全性提出了新的需求,目前这方面的研究尚在起步阶段。

参 考 文 献

- [1] 任丰原,黄海宁,林闯. 无线传感器网络. 软件学报,2003(3)
- [2] Akyildizetal I F. Wireless sensor networks;a survey. Computer Networks,2002,38(3):392-422
- [3] 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
- [4] Akkayaetal K. A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks. Ad Hoc Networks,2005,3: 325-349
- [5] Hedetniemi S,Liestman A. A survey of gossiping and broadcasting in communication networks. Networks,1988,18(4),319-349
- [6] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks // Proceeding of the Hawaii International Conference System Sciences. Hawaii,2000
- [7] Manjeshwar A, Agrawal D P. TEEN:a protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks // Proceedings of the 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing. San Francisco, CA,2001
- [8] Lindsey S, Raghavendra C S. PEGASIS:power efficient gathering in sensor information systems // Proceedings of the IEEE Aerospace Conference. Big Sky, Montana,2002
- [9] Heinzelman W, Kulik J, Balakrishnan H. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks // Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom_99). Seattle, WA,1999
- [10] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D. Directed diffusion;a scalable and robust communication paradigm for sensor net-

- works//Proceedings of the 6th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom_00). Boston, MA, 2000
- [11] Braginsky D, Estrin D. Rumor routing algorithm for sensor networks//Proceedings of the First Workshop on Sensor Networks and Applications (WSNA). Atlanta, GA, 2002
- [12] Karp B, Kung H T. GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless sensor networks//Proceedings of the 6th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom_00). Boston, MA, 2000
- [13] Yu Y, Estrin D, Govindan R. Geographical and energyaware routing: a recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks. Technical Report UCLA-CSD TR-01-0023. UCLA Computer Science Department, 2001
- [14] 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
- [15] He T, Stankovic J A, Lu C Y, et al. SPEED: a stateless protocol for real-time communication in sensor networks//Proceedings of International Conference on Distributed Computing Systems. Providence, RI, 2003
- [16] Sabbah E, Majeed A, Kang K D, et al. An Application Driven Perspective on Wireless Sensor Network Security//Proceedings of the 2nd ACM International Workshop on Quality of Service & Security for Wireless and Mobile Networks. Terromolinos, Spain, 2006:1-8

(上接第 10 页)

- [2] Rutledge L, Hardman L. Making RDF presentable: integrated global and local semantic Web browsing//Proceedings of the 14th International Conference on World Wide Web. 2005:199-206
- [3] Quan D A, Karger R. How to make a semantic web browser//Proceedings of the 13th International Conference on World Wide Web. 2004:255-265
- [4] Oren E, Delbru R, Decker S. Extending faceted navigation for RDF data//ISWC 2006, 5th International Semantic Web Conference. Athens, Georgia, USA, 2006, Proceedings, November 2006
- [5] Berners-Lee T, et al. Tabulator: Exploring and Analyzing linked data on the Semantic Web//Proceedings of the 3rd International Semantic Web User Interaction Workshop. 2006
- [6] OpenLink. [cited; Available at: <http://demo.openlinksw.com/DAV/JS/rdfbrowser/index.html>]
- [7] Ding L, et al. Swoogle: A Search and Metadata Engine for the Semantic Web//Proceedings of the Thirteenth ACM Conference on Information and Knowledge Management. 2005
- [8] DBLP XML Dump. 2006 [cited; Available at: <http://dblp.uni-trier.de/xml/>]
- [9] DBpedia. DBpedia 3.0 Download. 2008 [cited; Available at: <http://wiki.dbpedia.org/Downloads>]
- [10] W3C. Introduction to HTML 4. 1999 [cited; Available at: <http://www.w3.org/TR/html401/intro/intro.html>]
- [11] W3C. RDF Primer. 2004 [cited; Available at: <http://www.w3.org/TR/rdf-primer/>]
- [12] Steer D. RDF Author. 2003 [cited; Available at: <http://rdf-web.org/people/damian/RDFAuthor/>]
- [13] Pietriga E. IsaViz. [cited; Available at: <http://www.w3.org/2001/11/IsaViz/>]
- [14] Schraefel M C, et al. CS AKTive space: representing computer science in the semantic Web//Proceedings of the 13th International Conference on World Wide Web. 2004:384-392
- [15] Gibbins N, Harris S. Applying mSpace interfaces to the Semantic Web. Technical Report, 2003
- [16] DISCO. [cited; Available at: <http://sites.wiwiwiss.fuberlin.de/suhl/bizer/ng4j/disco/>]
- [17] Cheng G, et al. Searching Semantic Web Objects Based on Class Hierarchies, in *Linked Data on the Web (LDOW2008)*. 2008
- [18] 吴鸿汉, 翟裕忠. 理解语义网实体: 基于概念空间的摘要方法. 电子学报(审稿中), 2007
- [19] Brooke J. SUS: a quick and dirty usability scale. *Usability Evaluation in Industry*, 1996
- [20] Berners-Lee T. Linked Data. 2006 [cited; Available at: <http://www.w3.org/DesignIssues/LinkedData.html>]
- [21] W3C. Architecture of the World Wide Web. 2004 [cited; Available at: <http://www.w3.org/TR/webarch/>]
- [22] W3C. Dereferencing HTTP URIs. 2007 [cited; Available at: <http://www.w3.org/2001/tag/doc/httpRange-14/2007-05-31/HttpRange-14>]
- [23] Tummarello G, Delbru R, Oren E. Sindice.com: Weaving the Open Linked Data//Proceedings of the International Semantic Web Conference (ISWC). Nov. 2007
- [24] Page L, et al. The pagerank citation ranking: Bringing order to the web. 1998, Technical report. Stanford Digital Library Technologies Project, 1998
- [25] Kleinberg J M. Authoritative sources in a hyperlinked environment. *Journal of the ACM (JACM)*, 1999, 46(5):604-632
- [26] Wu H, et al. Comprehensive Summarization of URIs on the Semantic Web 2007. School of Computer Science and Engineering, Southeast University
- [27] Zhang X, Cheng G, Qu Y. Ontology summarization based on RDF sentence graph//Proc. of WWW. 2007:707-715
- [28] Ranganathan S R. Elements of library classification. Asia Publishing House New York, 1962
- [29] Yee P, et al. Faceted Metadata for Image Search and Browsing//Proceedings of ACM CHI 2003. 2003
- [30] Rutledge L, et al. Finding the story: broader applicability of semantics and discourse for hypermedia generation//Proceedings of the fourteenth ACM Conference on Hypertext and Hypermedia. 2003:67-76
- [31] Bizer C, et al. Fresnel - Display Vocabulary for RDF. 2005-2007 [cited; Available at: <http://www.w3.org/2005/04/fresnel-info/>]
- [32] Karger D, Schraefel M. The Pathetic Fallacy of RDF//SWUI06 Workshop at ISWC06. Athens, Georgia, 2006
- [33] W3C. Cascading Style Sheets. [cited; Available at: <http://www.w3.org/Style/CSS/>]
- [34] Giovanni Tummarello C M, Bachmann-Gmür R, Erling O. RDF-Sync: Efficient Remote Synchronization of RDF Models//International Semantic Web Conference. 2007
- [35] Zeginis D, Tzitzikas Y, Christophides V. On the Foundations of Computing Deltas Between RDF Models//International Semantic Web Conference. 2007