

## 无线传感器网络路由协议研究进展<sup>\*</sup>

唐 勇<sup>1+</sup>, 周明天<sup>1</sup>, 张 欣<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(电子科技大学 计算机科学与工程学院, 四川 成都 610054)

<sup>2</sup>(电子科技大学 通信与信息工程学院, 四川 成都 610054)

### Overview of Routing Protocols in Wireless Sensor Networks

TANG Yong<sup>1+</sup>, ZHOU Ming-Tian<sup>1</sup>, ZHANG Xin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(College of Computing Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

<sup>2</sup>(College of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-28-83242009, E-mail: worldgulit@tom.com, <http://www.uestc.edu.cn>

**Tang Y, Zhou MT, Zhang X. Overview of routing protocols in wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2006,17(3):410–421.** <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/410.htm>

**Abstract:** Wireless sensor networks are different from traditional networks and highly dependent on applications, so traditional routing protocols cannot be applied efficiently to them. Therefore many routing protocols for wireless sensor networks are studied. After describing the characteristics of wireless sensor networks, the classification standards for routing protocols are presented. Then the key mechanisms of the existing representative routing protocols are analyzed and their classifications, characteristics and application areas are compared. Finally, the important features that good routing protocols possess are summarized, and the future research strategies and trends.

**Key words:** wireless sensor network; ad hoc network; routing protocol; routing mechanism

**摘 要:** 无线传感器网络具有与传统网络不同的特点,且与应用高度相关.传统路由协议不能有效地用于无线传感器网络,因而人们研究了众多的无线传感器网络路由协议.在介绍无线传感器网络的特点后,提出了路由协议的分类方法,然后着重分析了当前一些较为重要的路由协议的核心路由机制,并采用比较方式指出了这些路由协议的类别、特点和主要应用范围.最后总结了好的路由协议应具有的特点以及未来的研究策略与发展趋势.

**关键词:** 无线传感器网络;自组织网络;路由协议;路由机制

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

随着无线通信、电子与传感技术的发展,无线传感器网络(wireless sensor networks,简称 WSNs)引起了人们的广泛关注<sup>[1]</sup>.WSNs 由具有传感、数据处理和短距离无线通信功能的传感器组成,在军事国防、环境监测、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<sup>[1–3]</sup>.

WSNs 与传统固定网络有很大的不同.与 WSNs 最为相似的是移动自组织网络(mobile ad hoc networks,简称 MANET),尽管二者都是无线自组织多跳网络,但差异很大<sup>[1–4]</sup>:WSNs 节点不移动或很少移动,而 MANET 节

点移动性强;WSNs 的数据包更小,因而数据传输开销更大;WSNs 节点的计算、存储、通信能力更有限;WSNs 节点因能量耗尽而易失效;WSNs 节点通信高能耗,数据计算低能耗,而这种差异在 MANET 中并不重要;WSNs 一般独立成网,主要用于监测功能,是以数据为中心的网络,MANET 则能为分布式应用提供互联、计算能力;WSNs 节点可达上千,远大于 MANET 的几十个节点;WSNs 网络流量具有 many-to-one 和 one-to-many 的特点;WSNs 节点合作完成监测任务,与应用高度相关,数据相关性较大;WSNs 节点一般没有统一编址(在某些应用中可对节点编址)。

WSNs 的上述特点使得众多传统固定网络与 MANET 的路由协议不能有效地应用于 WSNs。研究人员正在努力研究适合 WSNs 的路由协议。本文分析与总结了当前较重要的 WSNs 路由协议的分类方法、核心路由机制与特点,指出了将来的研究策略与发展趋势,目的在于更好地理解 WSNs 路由,为路由协议的进一步研究提供参考。

## 1 无线传感器网络路由协议分类方法

WSNs 路由协议负责在 sink 点和其余节点间可靠地传输数据。由于 WSNs 与应用高度相关,单一的路由协议不能满足各种应用需求,因而人们研究了众多的路由协议。为揭示协议特点,我们根据文献[5-25]中路由协议采用的通信模式、路由结构、路由建立时机、状态维护、节点标识和投递方式等策略,运用多种分类方法对其进行了分类。由于研究人员组合多种策略来实现路由机制,故同一路由协议可分属不同类别。

(1) 根据传输过程中采用路径的多少,可分为单路径路由协议和多路径路由协议。单路径路由节约存储空间,数据通信量少;多路径路由容错性强,健壮性好,且可从众多路由中选择一条最优路由。

(2) 根据节点在路由过程中是否有层次结构、作用是否有差异,可分为平面路由协议和层次路由协议。平面路由简单,健壮性好,但建立、维护路由的开销大,数据传输跳数多,适合小规模网络;层次路由扩展性好,适合大规模网络,但簇的维护开销大,且簇头是路由的关键节点,其失效将导致路由失败。

(3) 根据路由建立时机与数据发送的关系,可分为主动路由协议、按需路由协议和混合路由协议。主动路由建立、维护路由的开销大,资源要求高;按需路由在传输前需计算路由,时延大;混合路由则综合利用这两种方式。

(4) 根据是否以地理位置来标识目的地、路由计算中是否利用地理位置信息,可分为基于位置的路由协议和非基于位置的路由协议。有大量 WSNs 应用需要知道突发事件的地理位置,这是基于位置的路由协议的应用基础,但需要 GPS 定位系统或者其他定位方法协助节点计算位置信息。

(5) 根据是否以数据来标识目的地,可分为基于数据的路由协议和非基于数据的路由协议。有大量 WSNs 应用要求查询或上报具有某种类型的数据,这是基于数据的路由协议的应用基础,但需要分类机制对数据类型进行命名。

(6) 根据节点是否编址、是否以地址标识目的地,可分为基于地址的路由协议和非基于地址的路由协议。基于地址的路由在传统路由协议中较常见,而在 WSNs 中一般不单独使用而与其他策略结合使用。

(7) 根据路由选择是否考虑 QoS 约束,可分为保证 QoS 的路由协议和不保证 QoS 的路由协议。保证 QoS 的路由协议是指在路由建立时,考虑时延、丢包率等 QoS 参数,从众多可行路由中选择一条最适合 QoS 应用要求的路由。

(8) 根据数据在传输过程中是否进行聚合处理,可分为数据聚合的路由协议和非数据聚合的路由协议。数据聚合能减少通信量,但需要时间同步技术的支持,并使传输时延增加。

(9) 根据路由是否由源节点指定,可分为源站路由协议和非源站路由协议。源站路由协议节点无须建立、维护路由信息,从而节约存储空间,减少通信开销。但如果网络规模较大,数据包头的路由信息开销也大,而且如果网络拓扑变化频繁,将导致路由失败。

(10) 根据路由建立时机是否与查询有关,可分为查询驱动的路由协议和非查询驱动的路由协议。查询驱动的路由协议能够节约节点存储空间,但数据时延较大,且不适合环境监测等需紧急上报的应用。

## 2 无线传感器网络路由协议分析

通过对当前 WSNs 路由协议的研究,我们选取了以下较为重要的路由协议,对其核心路由机制、特点和优缺点等进行了分析.

(1) Flooding 协议和 Gossiping 协议<sup>[5]</sup>.这是两个最为经典和简单的传统网络路由协议,可应用到 WSNs 中.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(节点几乎同时从邻节点收到多份相同数据)、交叠(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(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.

(2) SPIN 协议<sup>[6]</sup>.这是第 1 个基于数据的路由协议.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,为避免盲目传播,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,数据通过 DATA 消息发送到请求节点.协议的优点是:小 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.但其缺点是: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,当网络中大多节点都是潜在 sink 点时,问题并不严重,但当 sink 点较少时,则是一个很严重的问题;且当某 sink 点对任何数据都需要时,其周围节点的能量容易耗尽;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.图 1 表示了 SPIN 协议的路由建立与数据传输.

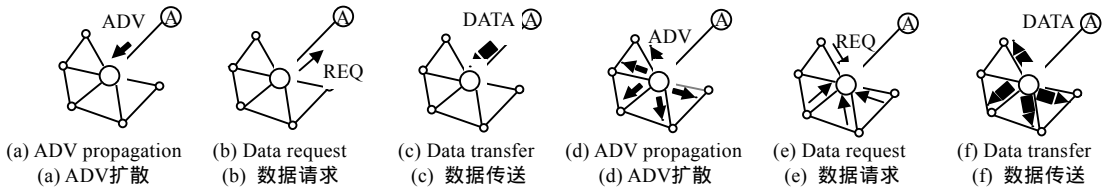


Fig.1 Routing setup and data transmission in SPIN protocol

图 1 SPIN 协议的路由建立与数据传输

(3) Directed Diffusion 协议<sup>[7]</sup>.这是一个重要的基于数据的、查询驱动的路由协议.该协议用属性/值对命名数据.为建立路由,sink 点 flooding 包含属性列表、上报间隔、持续时间、地理区域等信息的查询请求 Interest (该过程本质上是设置一个监测任务).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.该协议采用多路径,健壮性好;使用数据聚合能减少数据通信量;sink 点根据实际情况采取增强或减弱方式能有效利用能量;使用查询驱动机制按需建立路由,避免了保存全网信息,但不适合环境监测等应用.而且,Gradient 的建立开销很大,不适合多 sink 点网络;数据聚合过程采用时间同步技术,会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.

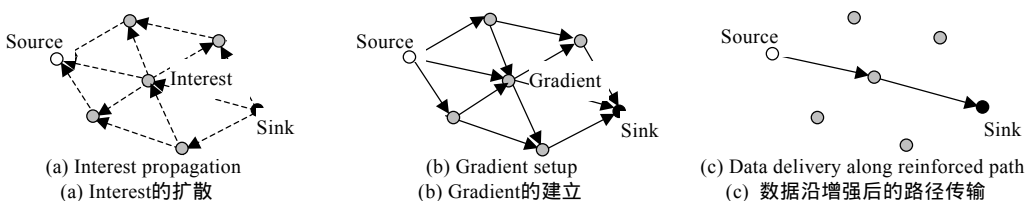


Fig.2 Procedure of routing setup in Directed Diffusion protocol

图 2 Directed Diffusion 协议的路由建立过程

(4) Rumor 协议<sup>[8]</sup>.如果 sink 点的一次查询只需一次上报,Directed Diffusion 协议开销就太大了,Rumor 协议正是为解决此问题而设计的.该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.当节点监测到事件后将其保存,并创建称为 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.sink 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.在多 sink 点、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.图 3 表示了 Rumor 协议中 Agent 传播和 Agent 路径与查询路径的交叉情形.

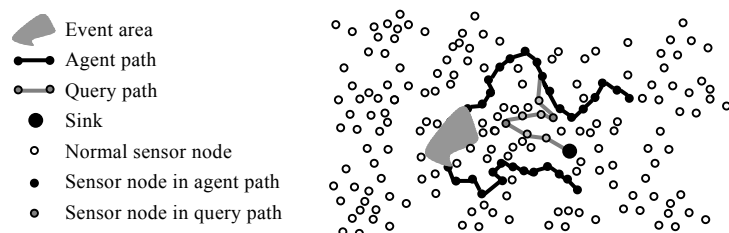


Fig.3 Agent propagation and cross of Agent path and query path in Rumor protocol

图 3 Rumor 协议中 Agent 传播和 Agent 路径与查询路径的交叉

(5) GPSR 协议<sup>[9]</sup>.这是一个典型的基于位置的路由协议.使用 GPSR 协议,网络节点都知道自身地理位置并被统一编址,各节点利用贪心算法尽量沿直线转发数据.产生或收到数据的节点向以欧氏距离计算最靠近目的节点的邻节点转发数据,但由于数据会到达没有比该节点更接近目的点的区域(称为空洞),导致数据无法传输,当出现这种情况时,空洞周围的节点能够探测到,并利用右手法则沿空洞周围传输来解决此问题.该协议避免了在节点中建立、维护、存储路由表,只依赖直接邻节点进行路由选择,几乎是一个无状态的协议;且使用接近于最短欧氏距离的路由,数据传输时延小;并能保证只要网络连通性不被破坏,一定能够发现可达路由.但缺点是,当网络中 sink 点和源节点分别集中在两个区域时,由于通信量不平衡易导致部分节点失效,从而破坏网络连通性;需要 GPS 定位系统或其他定位方法协助计算节点位置信息.图 4 表示了 GPSR 协议中出现空洞及避开空洞的情形.

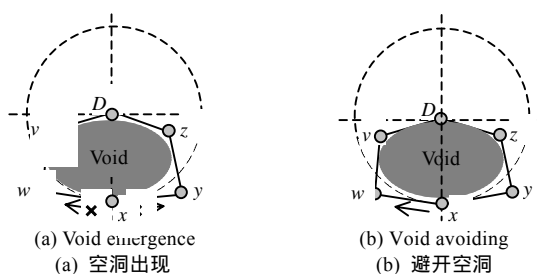


Fig.4 Void emergence and void avoiding in GPSR protocol

图 4 GPSR 协议中的空洞出现及避开空洞

(6) TBF 协议<sup>[10]</sup>.这是一个基于源站和基于位置的路由协议.与 GPSR 协议不同,TBF 协议不是沿着最短路径传播;与通常的源站路由协议不同,TBF 协议利用参数在数据包头中指定了一条连续的传输轨道而不是路由节点序列.网络节点利用贪心算法根据轨道参数和邻节点位置,计算出最接近轨道的邻节点作为下一跳节点.该协议可利用 GPSR 协议的方法或其他方法避开空洞;通过指定不同的轨道参数,很容易实现多路径传播、广播、对特定区域的广播和多播;源站路由避免了中间节点存储大量路由信息;指定轨道而不是节点序列,数据包头的

路由信息开销不会随着网络变大而增加,允许网络拓扑变化,避免了传统源站路由协议的缺点.但随着网络规模变大,路径加长,沿途节点进行计算的开销也相应增加;且需要 GPS 定位系统或其他定位方法协助计算节点位置信息.图 5 表示使用 TBF 协议沿着任意曲线传输数据.

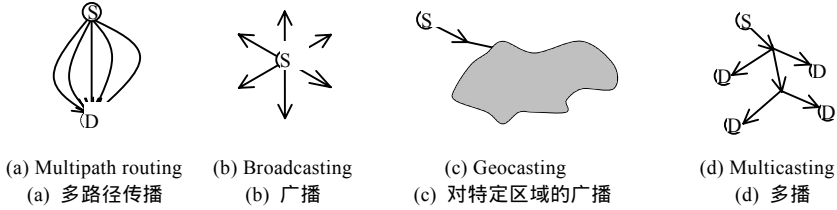


Fig.5 Forwarding data along arbitrary curves in TBF protocol

图 5 TBF 协议沿着任意曲线传输数据

(7) Shah 等人提出的能量感知路由协议<sup>[11]</sup>.该协议的目的主要在于改善 Directed Diffusion 协议的耗能情况,采用地理位置和数据类型(即节点类型)标识节点. Shah 等人认为该协议是按需路由协议,但其含义更多的是查询驱动的,我们将其与 Directed Diffusion 都列为主动路由协议. sink 点( $Cost(sink)=0$ )利用受控的 flooding 发起建立路由请求,产生或转发路由请求节点  $N_i$  的所有邻节点  $N_j$  测量与  $N_i$  的通信开销以及  $N_i$  的剩余能量:  $Metric(N_j, N_i)$ .  $N_j$  根据式(a)计算代价  $C_{N_j, N_i}$ ,  $N_j$  节点选择  $C_{N_j, N_i}$  较小的一些邻节点反向构造路由表  $FT_j$ , 邻节点  $N_i$  被赋予由式(b)计算的路由概率  $P_{N_j, N_i}$ , 此后  $N_j$  节点由式(c)计算自身代价  $Cost(N_j)$ , 然后  $N_j$  转发包含自身代价信息的请求.在通信阶段,节点  $N_j$  根据  $P_{N_j, N_i}$  选择一条路径进行数据发送.与 Directed Diffusion 相比,该协议虽然存在多条路径,但只选用一条,能够有效节约能源 40%以上;随机选择路由方式平衡了通信量.其缺点是, sink 点需要周期性 flooding 维护路由信息;需要进行节点间收发开销和剩余能量测量;根据概率随机选择一条路径导致其可靠性不如 Directed Diffusion 协议.

$$C_{N_j, N_i} = Cost(N_i) + Metric(N_j, N_i) \quad (a)$$

$$P_{N_j, N_i} = \frac{1/C_{N_j, N_i}}{\sum_{k \in FT_j} 1/C_{N_j, N_k}} \quad (b)$$

$$Cost(N_j) = \sum_{i \in FT_j} P_{N_j, N_i} C_{N_j, N_i} \quad (c)$$

(8) LEACH 协议<sup>[12]</sup>.这是第一个提出数据聚合的层次路由协议.为平衡网络各节点的能耗,簇头是周期性按轮随机选举的,每轮选举方法是:各节点产生一个[0,1]之间的随机数,如果该数小于  $T(n)$ ,则该节点为簇头.  $T(n)$  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,  $p$  是网络中簇头数与总节点数的百分比,  $r$  是当前的选举轮数,  $G$  是最近  $1/p$  轮不是簇头的节点集.成为簇头的节点在无线信道中广播这一消息,其余节点选择加入信号最强的簇头.节点通过一跳通信将数据传送给簇头,簇头也通过一跳通信将聚合后的数据传送给 sink 点.该协议采用随机选举簇头的方式避免簇头过分消耗能量,提高了网络生存时间;数据聚合能有效减少通信量.但协议层次化的目的在于数据聚合,仍采用一跳通信,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.

(9) PEGASIS 协议<sup>[13]</sup>.这是在 LEACH 协议基础上建立的协议.仍然采用动态选举簇头的思想,但为避免频繁选举簇头的通信开销,采用无通信量的簇头选举方法,且网络中所有节点只形成一个簇,称为链.该协议要求每个节点都知道网络中其他节点的位置,通过贪心算法选择最近的邻节点形成链.动态选举簇头的方法很简单:

设网络中  $N$  个节点都用  $1 \sim N$  的自然数编号,第  $j$  轮选取的簇头是第  $i$  个节点,  $i=j \bmod N$  ( $i$  为 0 时,取  $N$ )。簇头与 sink 点一跳通信,利用令牌控制链两端数据沿链传送到簇头本身,在传送过程中可聚合数据。当链两端数据都传送完成时,开始新一轮选举与传输。该协议通过避免 LEACH 协议频繁选举簇头带来的通信开销以及自身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;节点采用小功率与最近距离邻节点通信,形成多跳通信方式,有效地利用了能量,与 LEACH 协议相比能大幅提高网络生存时间。但单簇方法使得簇头成为关键点,其失效会导致路由失败,且要求节点都具有与 sink 点通信的能力,如果链过长,数据传输时延将会增大,不适合实时应用;成链算法要求节点知道其他节点位置,开销非常大。图 6 表示了 PEGASIS 协议沿链进行数据传输的情况。

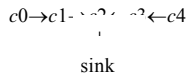


Fig.6 Data transmission along chain in PEGASIS protocol

图 6 PEGASIS 协议沿链进行数据传输

(10) TEEN 协议<sup>[14]</sup>。这是一个层次路由协议,利用过滤方式来减少数据传输量。该协议采用与 LEACH 协议相同的聚簇方式,但簇头根据与 sink 点距离的不同形成层次结构。聚簇完成后, sink 点通过簇头向全网节点通告两个门限值(分别称为硬门限和软门限)来过滤数据发送。在节点第 1 次监测到数据超过硬门限时,节点向簇头上报数据,并将当前监测数据保存为监测值(sensed value,简称 SV)。此后只有在监测到的数据比硬门限大且其与 SV 之差的绝对值不小于软门限时,节点才向簇头上报数据,并将当前监测数据保存为 SV。该协议通过利用软、硬门限减少了数据传输量,且层次型簇头结构不要求节点具有大功率通信能力。但由于门限设置阻止了某些数据上报,不适合需周期性上报数据的应用。图 7 表示了 TEEN 协议中由聚簇构成的层次结构。

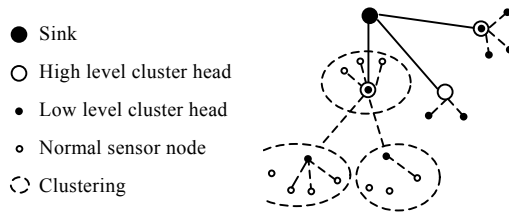


Fig.7 Hierarchical clustering in TEEN protocol

图 7 TEEN 协议中由聚簇构成的层次结构

(11) TTDD 协议<sup>[15]</sup>。这是一个层次路由协议,主要是解决网络中存在多 sink 点及 sink 点移动问题。当多个节点探测到事件发生时,选择一个节点作为发送数据的源节点,源节点以自身作为格状网(grid)的一个交叉点构造一个格状网。其过程是:源节点先计算出相邻交叉点位置,利用贪心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。交叉点保存了事件和源节点信息。进行数据查询时, sink 点本地 flooding 查询请求到最近的交叉节点,此后查询请求在交叉点间传播,最终源节点收到查询请求,数据反向传送到 sink 点。Sink 点在等待数据时,可继续移动,并采用代理(Agent)机制保证数据可靠传递。与 Directed Diffusion 协议相比,该协议采用单路径,能够提高网络生存时间,但计算与维护格状网的开销较大;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。图 8 表示 TTDD 协议的格状网建立与数据查询情况。

(12) SAR 协议<sup>[16]</sup>。这是第 1 个在 WSNs 中保证 QoS 的主动路由协议。sink 点的所有一跳邻节点都以自己为根创建生成树,在创建生成树过程中考虑节点的时延、丢包率等 QoS 参数以及最大数据传输能力,各个节点从而反向建立了到 sink 点的具有不同 QoS 参数的多条路径。节点发送数据时选择一条或多条路径进行传输。该协议能够提供 QoS 保证,但缺点是节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、节点 QoS 参数与能耗信息的更新均需较大开销。

(13) Chang 等人提出的最大化生存时间路由协议<sup>[17]</sup>。该协议与 Shah 等人的思想有相似之处,认为最小化传

输能量并不完全适合 WSNs,必须考虑网络的生存时间.它根据节点剩余能量与链路发送数据能量要求定义代价函数,最重要的贡献在于,利用网络流建模,采用线性规划方法来解决最大生存时间问题:定义代价函数为  $f(e_{ij}, E_i)$ , 其中  $e_{ij}$  是节点  $i, j$  发送数据消耗的能量,  $E_i$  是节点  $i$  剩余的能量,代价函数是关于  $e_{ij}$  的增函数、 $E_i$  的减函数.数据流在传输过程中动态改变流向以达到最大化网络生存时间,但需要知道各个节点的数据产生速率.

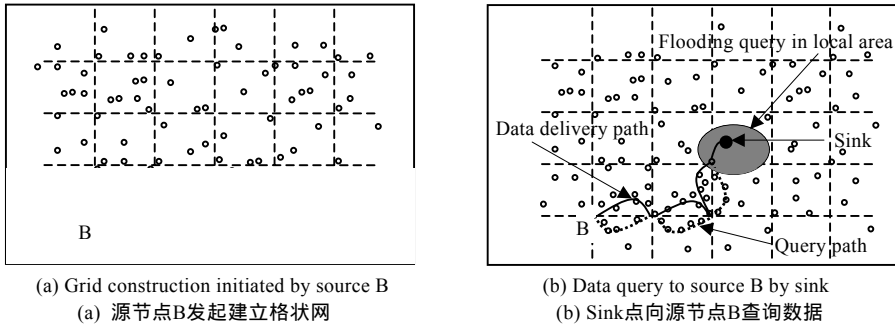


Fig.8 Grid construction and data query in TTDD protocol

图8 TTDD 协议的格状网建立与数据查询

(14) TinyOS Beaconing 协议<sup>[18]</sup>.该协议较为简单,首先对节点进行编址,sink 点周期性 flooding 路由更新消息,信号覆盖范围内的节点接收到更新消息后,将发送消息的节点作为父节点保存到路由表中,然后将该消息在物理信道上广播,从而构成了一个以 sink 点为根的广度优先的生成树.这种方式在小规模网络中简单、易用,但在较大网络中将导致节点和 sink 点间跳数增加;广播式路由更新消息消耗网络能量;路径建立只与接收到 beaconing 的时序有关,不进行任何优化,扩展性差;sink 点周围的节点由于过多地参与数据传输,耗能较多,容易失效.图 9 表示了以 sink 点  $u$  为根的生成树的建立过程.

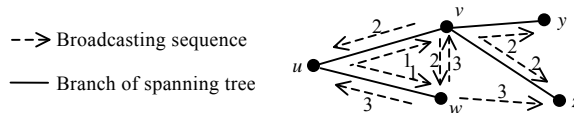


Fig.9 Procedure of constructing routing spanning tree in TinyOS Beaconing protocol

图9 TinyOS Beaconing 协议的路由生成树建立过程

(15) Ye 等人提出的最小代价路由协议<sup>[19]</sup>.该协议思想与很多协议的思想相同,以跳数或能耗作为代价尺度,最终达到最小化代价的目的,其特别之处在于采用退避算法进行代价通告.在初始阶段,除 sink 点将自身代价设为 0 以外,其余节点都将自己到 sink 点的代价设为  $\infty$ .sink 点利用无线信道广播包含自身代价的 ADV 消息,消息在网络中受控地扩散.当节点  $N$  从节点  $M$  接收到包含  $M$  代价的 ADV 消息时,知道有一条经  $M$  到 sink 点的路径,代价为  $L_M + C_{N,M}$ ,其中  $L_M$  为  $M$  到 sink 点的代价,  $C_{N,M}$  为  $N$  到  $M$  的代价.设当前  $N$  到 sink 点的代价为  $L_N$ ,如果  $L_M + C_{N,M} < L_N$ ,  $L_N$  被赋予  $L_M + C_{N,M}$ ,并启动一个随机退避定时器.当定时器溢出时将广播包含  $L_N$  的 ADV 消息,如果  $L_M + C_{N,M} > L_N$  不做任何动作.采用退避通告方式是为了避免节点多次广播自身的非最优代价.该协议与 TinyOS Beaconing 相比能节约能量,但仍有一些与其相同的缺点并需测量通信代价;由于代价函数只考虑了能耗最少而没有考虑节点剩余能量,会使通信量分担不平衡,导致某些节点因能量耗尽失效而使网络不能连通.

(16) 其他路由协议.由于 WSNs 与应用高度相关,路由协议众多.例如, Schurgers 等人提出的基于梯度的路由协议<sup>[20]</sup>是 Directed Diffusion 协议的一个变种,在 Interest 分发过程中记录了经过的跳数,可发现到 sink 点的最小跳数路由. CADR<sup>[21]</sup>也是 Directed Diffusion 协议的一个变种,其基本思想是尽量激活靠近事件周围的节点进行路由传输以减少时延. GEAR<sup>[22]</sup>是一种基于位置的协议,通过学习能量的使用情况调整路由,以达到有效利用能量的目的. SPEED<sup>[23]</sup>是一种基于位置的协议,主要目的是提供拥塞控制和软实时保证. Beacon Vector Routing<sup>[24]</sup>是一种基于地址的点对点协议,该类型在 WSNs 中并不常见. APTEEN<sup>[25]</sup>是对 TEEN 协议的改进,能够

根据用户与应用的不同动态地调整门限值.还有一些协议和算法将特定应用与路由结合起来考虑,如 COUGAR<sup>[26]</sup>,TinyDB<sup>[27]</sup>,ACQUIRE<sup>[28]</sup>,TAG<sup>[29]</sup>将 WSNs 视为分布式数据库,将路由与查询相结合;还有的协议是将路由与拓扑控制相结合,如 GAF<sup>[30]</sup>,SPAN<sup>[31]</sup>.

3 无线传感器网络路由协议比较

由于 WSNs 具有与应用高度相关的特点,故 WSNs 路由协议同样具有多样性的特点,难以进行比较,并且很难说哪个协议更为优越.为便于说明,我们采用了列表方式.表 1 使用本文的分类方法对重点讨论的路由协议进行了分类比较.表 2、表 3 对这些协议的特点和大致应用范围进行了总结与比较.协议特点包括:是否提供最短路径;是否存在由于其失效从而影响路由的关键节点;是否支持 sink 点移动;是否支持普通节点移动;建立、维护路由的节点所需的通信量、计算量与存储量.应用范围是指协议的较佳使用范围,但不是绝对的,应依具体应用而定.

Table 1 Comparison of classifications of routing protocols  
表 1 路由协议的分类比较

Protocol	Multipath	Unipath	Flat	Hierarchical	Proactive	Reactive	Hybrid
Flooding	√		√		√	√	
Gossiping		√	√		√	√	
SPIN	Possible	Possible	√			√	
Directed Diffusion	√		√		√		
Rumor		√	√				√
GPSR		√	√			√	
TBF	Possible	Possible	√			√	
Shah <i>et al.</i>		√	√		√		
LEACH		√		√	√		
PEGASIS		√		√	√		
TEEN		√		√	√		
TTDD		√		√	√		
SAR	Possible	Possible	√		√		
Chang, <i>et al.</i>		√	√		√		
TinyOS Beaconing		√	√		√		
Ye, <i>et al.</i>		√	√		√		

Protocol	Location-Based	Data-Based	Address-Based	QoS-Supported	Data aggregation	Source	Query-Driven
Flooding	Possible	Possible	Possible				
Gossiping	Possible	Possible	Possible				
SPIN		√			√		√
Directed Diffusion		√		Possible	√		√
Rumor		√			√		√
GPSR	√						
TBF	√					√	
Shah <i>et al.</i>	√	√			√		√
LEACH			√		√		
PEGASIS			√		√		
TEEN			√		√		
TTDD	√	√					
SAR			√	√			
Chang <i>et al.</i>			√				
TinyOS Beaconing			√				
Ye <i>et al.</i>			√				



**Table 2** Comparison of characteristics of routing protocols**表 2** 路由协议的特点比较

Protocol	Optimal path	Critical node	Sink mobility	Normal node mobility	Computation overhead of routing establishment & maintenance	Communication overhead of routing establishment & maintenance	Storage overhead of routing establishment & maintenance
Flooding	Shortest path	×	√	√	Not needed	Flooding data	Not needed
Gossiping	×	×	√	√	Not needed	Transmitting data along random path	Not needed
SPIN	Possible	×	√	√	Not needed	Flooding ADV	Not needed
Directed Diffusion	Possible	×	×	×	Computing & combining gradient	Flooding Interest	Storing Gradient & buffering Interest
Rumor	×	×	√	×	Combining Agent	Source sending Agent & sink sending query along random paths	Storing source & event
GPSR	Nearly	×	×	√	Computing neighbors' distance to sink	Getting neighbors' location	Not needed
TBF	×	×	×	√	Computing neighbors' distance to curve	Getting neighbors' location	Not needed
Shah, <i>et al.</i>	Suboptimal cost	×	×	×	Assigning neighbors' probability	Measuring neighbors' cost	Storing forwarding table
LEACH	×	Cluster head	×	×	Electing cluster head & comparing signal strength of cluster heads periodically	Clustering periodically	Storing cluster head
PEGASIS	×	Cluster head	×	×	Electing cluster head with little overhead	Constructing chain & passing token	Storing two neighbors along chain
TEEN	×	Cluster head	×	×	Electing cluster head & comparing signal strength of cluster heads periodically	Clustering periodically	Node storing cluster head & cluster head storing threshold
TTDD	×	Cross node	√	×	Computing cross node in grid	Constructing grid & sink flooding query locally	Cross node storing source & event
SAR	×	×	×	×	Not needed	Flooding routing request & measuring QoS metrics	Storing parent nodes in spanning trees & QoS metrics
Chang, <i>et al.</i>	Optimal cost	×	×	×	Computing cost function	Measuring neighbors' cost	Storing neighbors' cost
TinyOS Beaconing	×	×	×	×	Not needed	Flooding routing request	Storing parent node in spanning tree
Ye, <i>et al.</i>	Optimal cost	×	×	×	Comparing neighbors' cost	Advertising cost	Storing own cost & backoff timer

Table 3 Comparison of application areas of routing protocols

表 3 路由协议的应用范围比较

Protocol	Application areas
Flooding	Reporting emergent event; multiple sinks; high transmission reliability; node moving frequently; node fault frequently; low scalability
Gossiping	Multiple sinks; delay not aware; data loss tolerance; node moving; low scalability
SPIN	Multiple sinks; middle nodes knowing information whether more distant nodes needing data; low scalability
Directed Diffusion	Few sinks; query-driven WSNs; one query with periodical responses; QoS aware
Rumor	Multiple sinks & few events; delay not aware; query-driven WSNs; one query with one response; dense nodes
GPSR	Location aware; node moving frequently; dense nodes
TBF	Needing multiple routing approaches; node moving frequently; dense nodes
Shah, <i>et al.</i>	Node knowing neighbor's transmission cost; high network survivability; query-driven WSNs
LEACH	Delay aware; nodes with high power; low scalability
PEGASIS	Improvement over LEACH in energy consuming; delay aware; nodes with high power; low scalability
TEEN	Reporting data with threshold; improvement over LEACH & PEGASIS in scalability
TTDD	Multiple sinks; sink moving; query-driven WSNs; real-time not aware
SAR	Small-scale WSNs; QoS aware; low scalability
Chang, <i>et al.</i>	Node knowing neighbor's transmission cost; high network survivability
TinyOS Beaconing	Small-scale WSNs; low scalability
Ye, <i>et al.</i>	Node knowing neighbor's transmission cost; high network survivability; low scalability

4 总结与展望

由于 WSNs 资源有限且与应用高度相关,研究人员采用多种策略来设计路由协议.其中好的协议具有以下特点:针对能量高度受限的特点,高效利用能量几乎是设计的第一策略;针对包头开销大、通信耗能、节点有合作关系、数据有相关性、节点能量有限等特点,采用数据聚合、过滤等技术;针对流量特征、通信耗能等特点,采用通信量负载平衡技术;针对节点少移动的特点,不维护其移动性;针对网络相对封闭、不提供计算等特点,只在 sink 点考虑与其他网络互联;针对网络节点不常编址的特点,采用基于数据或基于位置的通信机制;针对节点易失效的特点,采用多路径机制.通过对当前的各种路由协议进行分析与总结,可以看出将来 WSNs 路由协议采用的某些研究策略与发展趋势:

(1) 减少通信量以节约能量.由于 WSNs 中数据通信最为耗能,因此应在协议中尽量减少数据通信量.例如,可在数据查询或者数据上报中采用某种过滤机制,抑制节点上传不必要的信息;采用数据聚合机制,在数据传输到 sink 点前就完成可能的数据计算.

(2) 保持通信量负载平衡.通过更加灵活地使用路由策略让各个节点分担数据传输,平衡节点的剩余能量,提高整个网络的生存时间.例如,可在层次路由中采用动态簇头;在路由选择中采用随机路由而非稳定路由;在路径选择中考虑节点的剩余能量.

(3) 路由协议应具有容错性.由于 WSNs 节点容易发生故障,因此应尽量利用节点易获得的网络信息计算路由,以确保在路由出现故障时能够尽快得到恢复;并可采用多路径传输来提高数据传输的可靠性.

(4) 路由协议应具有安全机制.由于 WSNs 的固有特性,其路由协议极易受到安全威胁,尤其是在军事应用中.目前的路由协议很少考虑安全问题,因此在一些应用中必须考虑设计具有安全机制的路由协议.

(5) WSNs 路由协议将继续向基于数据、基于位置的方向发展.这是由 WSNs 一般不统一编址和以数据、位置为中心的特点决定的.

References:

[1] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. IEEE Communications Magazine, 2002,40(8): 102-114.

- [2] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 2002,38(4): 393–422.
- [3] Cui L, Ju HL, Miao Y, Li TP, Liu W, Zhao Z. Overview of wireless sensor networks. *Journal of Computer Research and Development*, 2005,42(1):163–174 (in Chinese with English abstract).
- [4] Niculescu D, Americ NL. Communication paradigms for sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 2005,43(3):116–122.
- [5] Haas ZJ, Halpern JY, Li L. Gossip-Based ad hoc routing. In: *Proc. of the IEEE INFOCOM*. New York: IEEE Communications Society, 2002. 1707–1716.
- [6] Kulik J, Heinzelman WR, Balakrishnan H. Negotiation based protocols for disseminating information in wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 2002,8(2-3):169–185.
- [7] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D, Heidemann J. Directed diffusion for wireless sensor networking. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2003,11(1):2–16.
- [8] Braginsky D, Estrin D. Rumor routing algorithm for sensor networks. In: *Proc. of the 1st workshop on sensor networks and applications*. Atlanta: ACM Press, 2002. 22–31.
- [9] Karp B, Kung H. GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In: *Proc. of the 6th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking*. Boston: ACM Press, 2000. 243–254.
- [10] Niculescu D, Nath B. Trajectory based forwarding and its applications. In: *Proc. of the 9th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking*. San Diego: ACM Press, 2003. 260–272.
- [11] Shah R, Rabaey J. Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks. In: *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf.* Orlando: IEEE Communications Society, 2002. 350–355.
- [12] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In: *Proc. of the 33rd Annual Hawaii Int'l Conf. on System Sciences*. Maui: IEEE Computer Society, 2000. 3005–3014.
- [13] Lindsey S, Raghavendra CS. PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems. In: *Proc. of the IEEE Aerospace Conf.* Montana: IEEE Aerospace and Electronic Systems Society, 2002. 1125–1130.
- [14] Manjeshwar A, Agrawal DP. TEEN: A protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks. In: *Int'l Proc. of the 15th Parallel and Distributed Processing Symp.* San Francisco: IEEE Computer Society, 2001. 2009–2015.
- [15] Ye F, Luo H, Cheng J, Lu S, Zhang L. A two-tier data dissemination model for large-scale wireless sensor networks. In: *Proc. of the 8th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking*. Atlanta: ACM Press, 2002. 148–159.
- [16] Sohrabi K, Gao J, Ailawadhi V, Pottie GJ. Protocols for self-organization of a wireless sensor network. *IEEE Personal Communications*, 2000,7(5):16–27.
- [17] Chang JH, Tassiulas L. Maximum lifetime routing in wireless sensor networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2004,12(4): 609–619.
- [18] Karlof C, Wagner D. Secure routing in sensor networks: attacks and countermeasures. *Ad Hoc Networks*, 2003,1(1):293–315.
- [19] Ye F, Chen A, Lu S, Zhang L. A scalable solution to minimum cost forwarding in large sensor networks. In: *Proc. of the 10th Int'l Conf. on Computer Communications and Networks*. Arizona: IEEE Communications Society, 2001. 304–309.
- [20] Schurgers C, Srivastava MB. Energy efficient routing in wireless sensor networks. In: *Proc. of the MILCOM on Communications for Network-Centric Operations: Creating the Information Force*. Virginia: IEEE Communications Society, 2001. 357–361.
- [21] Chu M, Haussecker H, Zhao F. Scalable information-driven sensor querying and routing for ad hoc heterogeneous sensor networks. *The Int'l Journal of High Performance Computing Applications*, 2002,16(3):293–313.
- [22] Yu Y, Estrin D, Govindan R. Geographical and energy-aware routing: A recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks. UCLA-CSD TR-01-0023, Los Angeles: University of California, 2001. 1–11.
- [23] He T, Stankovic JA, Lu C, Abdelzaher T. SPEED: A stateless protocol for real-time communication in sensor networks. In: *Proc. of 23rd Int'l Conf. on Distributed Computing Systems*. Rhode Island: IEEE Computer Society, 2003. 46–55.
- [24] Fonseca R, Ratnasamy S, Culler D, Shenker S, Stoica I. Beacon vector routing: Scalable point-to-point in wireless sensor networks. IRB-TR-04-012, Berkeley: Intel Research, 2004. 1–14.

- [25] Manjeshwar A, Agrawal DP. APTEEN: A hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks. In: Proc. of the 2nd Int'l Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing. Florida: IEEE Computer Society, 2002. 195–202.
- [26] Yao Y, Gehrke J. The cougar approach to in-network query processing in sensor networks. SIGMOD Record, 2002,31(3):9–18.
- [27] Madden S, Franklin M, Hellerstein J, Hong W. TinyDB: An acquisitional query processing system for sensor networks. ACM Trans. on Database Systems, 2005,30(1):122–173.
- [28] Sadagopan N, Krishnamachari B, Helmy A. The acquire mechanism for efficient querying in sensor networks. In: Proc. of the 1st Int'l Workshop on Sensor Network Protocol and Applications. Alaska: IEEE Communications Society, 2003. 149–155.
- [29] Madden S, Franklin M, Hellerstein J, Hong W. TAG: A tiny aggregation service for ad hoc sensor networks. In: Proc. of the 5th Symp. on Operating Systems Design and Implementation. Boston: ACM Press, 2002. 131–146.
- [30] Xu Y, Heidemann J, Estrin D. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. In: Proc. of the 7th Annual ACM/IEEE Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. Rome: ACM Press, 2001. 70–84.
- [31] Chen B, Jamieson K, Balakrishnan H, Morris R. Span: An energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks. ACM Wireless Networks Journal, 2002,8(5):481–494.

#### 附中文参考文献:

- [3] 崔莉,鞠海玲,苗勇,李天璞,刘巍,赵泽.无线传感器网络研究进展.计算机研究与发展,2005,42(1):163–174.



唐勇(1973 - ),男,云南云县人,博士生,主要研究领域为无线网络,网络计算,网络管理.



张欣(1973 - ),女,硕士生,主要研究领域为无线网络,多媒体通信.



周明天(1939 - ),男,教授,博士生导师,CCF高级会员,主要研究领域为网络计算,分布式计算,信息安全.