



无线传感器网络的路由协议



7.1 路由协议概述

7.1.1 无线传感器网络路由协议的考虑因素

设计无线传感器网络的路由要考虑的因素很多，大致分为以下两种类型。

(1)网络特征：无线传感器网络具有与众不同的特征，应用于路由协议设计时，主要应该考虑能量损耗、节点部署和网络拓扑变化。

(2)数据传输特征：无线传感器网络的数据采集和传输要求与其他网络不同，因此路由协议设计时也需要加以区别，主要考虑数据传输方式、无线传输手段以及数据融合技术等。



7.1.2路由的过程

无线传感器网络的路由过程主要分为以下4个步骤：

- ①某一个设备发出路由请求命令帧，启动路由发现过程；
- ②对应的接收设备收到该命令后，回复应答命令帧；
- ③对潜在的各条路径开销(跳转次数、延迟时间)，进行评估比较；
- ④将评估确定之后的最佳路由记录添加到此路径上各个设备的路由表中。



7.1.3无线传感器网络路由协议分类方法

1. 按源节点获取路径的方法

(1)主动路由协议

(2)按需路由协议

(3)混合路由协议



7.1.3 无线传感器网络路由协议分类方法

2. 按节点参与通信的方式

(1) 直接通信路由协议

(2) 平面路由协议

(3) 层次路由协议



7.1.3 无线传感器网络路由协议分类方法

3. 按路由的发现过程

(1) 以位置信息为中心的路由协议

(2) 以数据为中心的路由协议



7.1.3 无线传感器网络路由协议分类方法

4. 按路由选择是否考虑服务质量(QoS)约束

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，从多条可行的路由中选择一条最适合QoS应用要求的路由；或者根据业务类型，保证满足不同业务需求的QoS路由协议。



7.2 平面路由协议

7.2.1 Flooding and Gossip协议

1. 洪泛路由协议

洪泛路由协议(Flooding Protocol)是一种最早的路由协议，接收到消息的节点以广播的形式转发报文给所有的邻居节点。

洪泛法的优点和缺点都十分突出，其优点是实现简单，适用于健壮性要求高的场合；其缺点是存在信息爆炸问题、出现部分数据交迭的现象和盲目使用资源等。

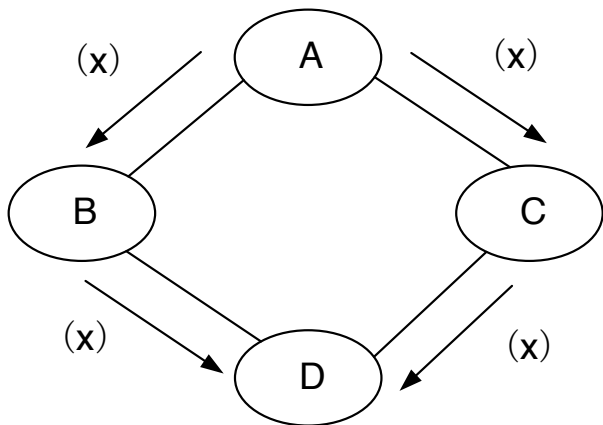


图 7-1 洪泛法的信息爆炸问题

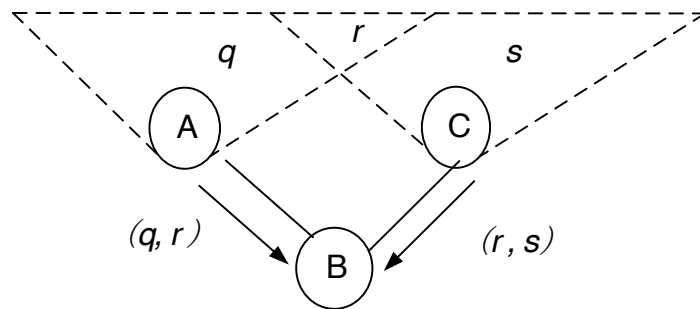


图 7-2 洪泛法的信息重叠问题

2. 闲聊法

闲聊法(Gossip)是洪泛法的改进版本。

在某一个节点发送数据时，不再像洪泛法那样给它的每个邻居节点都发送数据副本，而是随机选择某个邻居节点，向它发送一份数据副本。接收到数据的节点采用相同的方法，随机选择下一个接收节点发送数据，如图7-3所示。

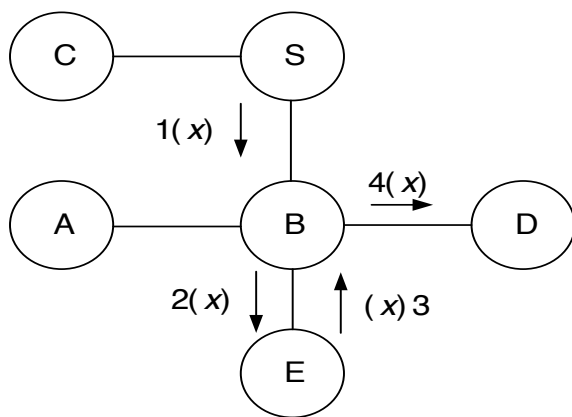


图 7-3 闲聊法协议过程



7.2.2 SPIN协议

基于协商机制的传感器网络SPIN协议(Sensor Protocols for Information via Negotiation)是一种以数据为中心的自适应通信方式，使用3种类型的信息进行通信，即ADV、REQ和DATA信息。

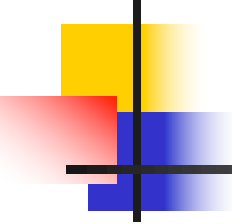


图7-4表示了SPIN协议的工作过程。在发送一个DATA数据包之前，一个传感器节点首先对外广播ADV数据包；如果某个邻居节点在收到ADV后有意愿接收该DATA数据包，那么它向该节点发送一个REQ数据包，然后节点向该邻居节点发送DATA数据包。类似地进行下去，DATA数据包可被传输到远方汇聚节点或基站。

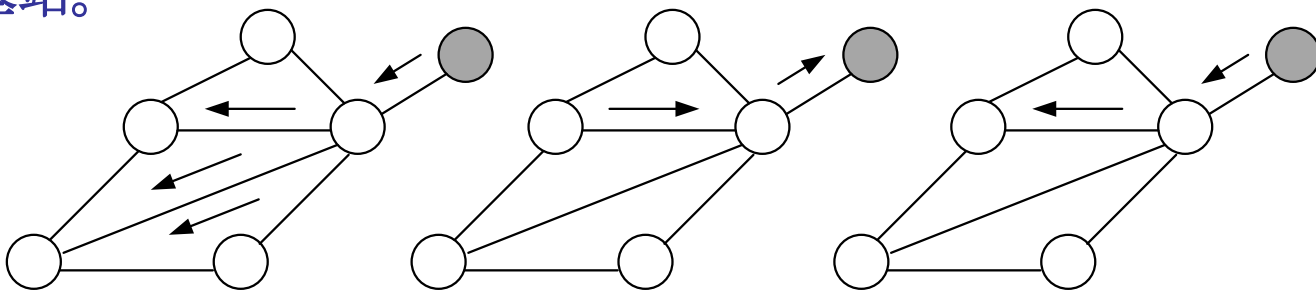
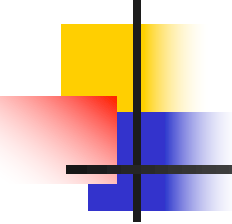


图 7-4 SPIN协议工作过程



SPIN协议的缺点是没有考虑节能和多种信道条件下的数据传输问题。因此，后续又出现了**SPIN-PP** (**Point to Point**, 点到点的通信模式)、**SPIN-EC** (**Energy Control**, 点到点模式下的节能路由)、**SPIN-RL** (**Route Lossy**, 点到点通信中的信道衰减模式)、**SPIN-BC** (**Broadcast Channel**, 广播信道模式)等在**SPIN**基础上改进的路由协议。



7.2.3 SAR、DD和MCFA协议

1. SAR协议

- 顺序分配路由SAR协议(Sequential Assignment Routing)
- 具有QoS意识的路由协议
- 以Sink的单跳邻居节点为根节点的多播树
- 不适用于大型的和拓扑频繁变化的网络



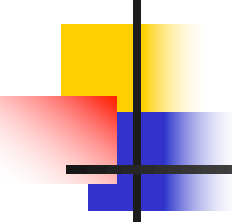
2. DD协议

- 定向扩散路由DD协议(Directed Diffusion)
- 以数据为中心
- 基于属性的命名机制来描述数据
- 发送对某个命名数据的Interest来完成数据收集



3. MCFA协议

- MCFA协议(Minimum Cost Forwarding Algorithm for Large Sensor Networks)
- 传感器网络中的数据传输不对称的特点
 - 开销域
 - 能量和路径情况灵活测出开销



该算法根据能量和路径情况来灵活地测出节点的开销情况，但是它存在着如下一些问题：首先它不得不考虑延迟、信道错误和节点失败等问题，这就增大了算法的复杂度；其次，Sink节点的数目不能太多，否则节点要存储大量到Sink节点的开销信息，会增大存储负担；再次，开销域的建立时间取决于网络的大小，如果网络太大的话，建立整个开销域的时间会让人无法忍受；最后，网络负载不是很平衡，那些距离Sink节点较近的开销较小的节点容易很快耗尽能量。



7.3 层次路由协议

7.3.1 LEACH

低功耗自适应聚类分级LEACH协议(LOW Energy Adaptive Clustering Hierarchy)是无线传感器网络中最早提出的分层路由算法。LEACH可以将网络整体生存时间延长15%，其基本思想是通过随机循环地选择簇头节点将整个网络的能量负载平均分配到每个传感器节点中，从而降低网络能源消耗，提高网络整体生存时间。

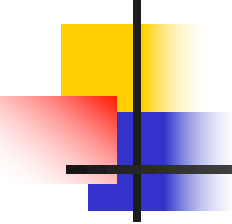


7.3.2 PEGASIS

高能效采集传感器信息系统PEGASIS协议(Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems)是在LEACH协议上提出的一种改进路由算法。PEGASIS路由协议在网络中选择一个节点作为起始节点建立一条最优回路链，起始节点将数据融合后的数据信息发送给Sink节点。由于起始节点的负载较重，PEGASIS采用了全网节点轮流作为回路链起始节点的方式来进行均衡。

PEGASIS的模型假设如下：

- ① 节点都知道其他节点的位置信息，每个节点都具有直接和基站通信的能力；
- ② 传感器节点不具有移动性；
- ③ 其他模型假设和LEACH中的相同。



该路由协议中使用了贪婪算法(Greedy Algorithm)来形成链，如图7-5所示。在每一轮通信之前才形成链。为确保每个节点都有其相邻节点，从离基站最远的节点开始构建，链中邻居节点的距离会逐渐增大，因为已经在链中的节点不能被再次访问，当其中一个节点失效时，链必须重构。

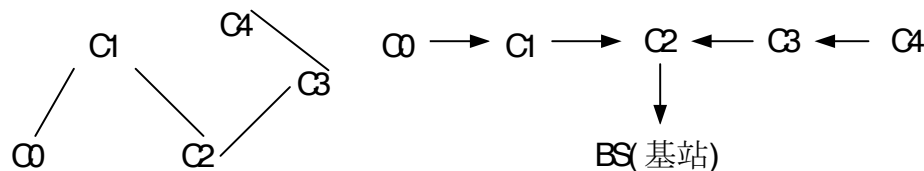


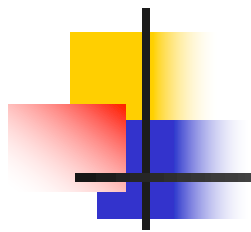
图 7-5 PEGASIS 数据传输链的形成

7.3.5 平面路由协议和层次路由协议比较

表7-1为各种协议之间的简单对比，主要从移动性、能量需求、路径长度、扩展性、路由状态复杂度、计算和通信所需开销、数据融合技术等多方面进行了分析比较。

表 7-1 无线传感器网络各种路由协议性能比价表

协 议	移 动 性	能 量 需 求	路 径 长 度	扩 展 性	路 由 状 态 复 杂 度	计 算 和 通 信 开 销	数 据 融 合
SPIN	支持移动性	能量有限	最短	有限	简单	ADV 包和数据包的扩散	有
DD	有限的移动性	能量有限	几乎最短	有限	每对节点和基站维持状态信息	开销太大	有
MCFA	不支持移动性	—	最短取决开销	好	每个 Sink 节点维持状态信息	开销域的的建立和单跳广播	无
LEACH	固定的基站	基站需要高能	—	好	簇头节点维持状态信息	群的建立和维持	有
PEGASIS	固定的基站	基站需要高能	固定	无	简单	同 LEACH 再加上链的建立	有
TEEN	固定的基站	基站需要高能	—	好	简单	同 LEACH	有
TTDD	移动的基站	能量有限	最短路径的 $\sqrt{2}$ 倍	一般	每个事件维持状态信息	方格建立，查询扩散和轨迹前行	无



总体来看，由于网络结构的不同，平面路由和层次路由体现出了以下几处差异。

- ① 移动性
- ② 能量使用
- ③ 路由选择
- ④ 可拓展性
- ⑤ 开销



7.4 能量感知路由

7.4.1 能量消耗源

1. 通信相关的能量消耗
2. 计算相关的能量消耗

7.3.2 能量路由

能量路由是最早提出的传感器网络路由机制之一，根据节点的可用能量(Power Available, PA)或传输路径上链路的能量需求，选择数据的转发路径。节点可用能量就是节点当前的剩余能量。在如图7-6所示的网络中，源节点是一般功能的传感器节点，完成数据采集工作。

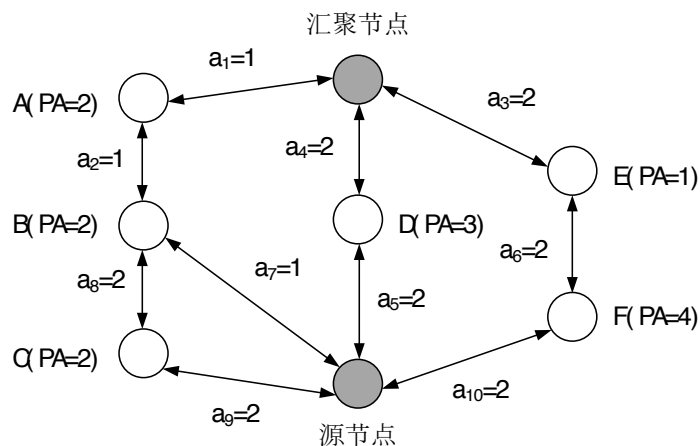
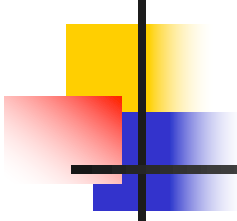


图 7-6 能量路由算法示意



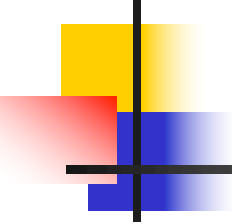
汇聚节点是数据发送的目标节点。大写字母表示节点，如节点A，节点右侧括号内的数字表示节点的可用能量。图中的双向线表示节点之间的通信链路，链路上的数字表示在该链路上发送数据消耗的能量。在图中，从源节点到汇聚节点的可能路径有4条。

路径1：源节点—B—A—汇聚节点，路径上所有节点PA之和为4，在该路径上发送分组需要的能量之和为3；

路径2：源节点—C—B—A—汇聚节点，路径上所有节点PA之和为6，在该路径上发送分组需要的能量之和为6；

路径3：源节点—D—汇聚节点，路径上所有节点PA之和为3，在该路上发送分组需要的能量之和为4；

路径4：源节点—F—E—汇聚节点，路径上所有节点PA之和为5，在该路径上发送分组需要的能量之和为6。

- 
-
- 能量路由选择策略主要有以下几种：
 - 最大可用能量路由
 - 最小能量消耗路由
 - 最少跳数路由
 - 最大最小PA节点路由
 - 缺点：
 - 全局信息
 - 单一路径使用导致能量枯竭



7.4.3 能量多路径路由

能量多路径路由的主要流程描述如下：

(1) 发起路径建立

目的节点广播路径建立消息，启动路径建立过程。广播消息中包含一个代价域，表示发出该消息的节点到目的节点路径上的能量信息，设初始值为零。

(2) 判断是否转发路径建立消息

当某一个节点接收到邻居节点发送的路径建立消息时，与发送该消息的节点进行比较，如果自己距离源节点更近，并且距离目的节点更远的情况下，才转发该路径建立消息，否则丢弃该消息。

(3) 计算能量代价

如果节点决定转发路径建立消息，需要计算新的代价值来替代原来的代价值。



(4)节点加入路径条件

代价太大的路径对网络生存时间没有益处，因此并非每个路径都是可用的，节点需要丢弃代价太大的路径。

(5)节点选择概率计算

为了均衡网络中节点的能量消耗，节点选择概率需与能量消耗成反比。

(6)代价平均值计算

节点根据路由表中的能量代价和下一跳节点选择概率计算本身到目的节点的代价。



7.5基于查询的路由

基于查询的路由协议，在需要不断查询传感器节点采集的数据的应用中，通信流量主要产生于查询节点和传感器节点之间的命令和数据传输，同时传感器节点的采样信息在传输路径上通常要进行数据融合，通过减少通信流量来节省能量。



7.5.1 定向扩散路由

定向扩散(Directed Diffusion, DD)是一种基于查询的路由机制，是专门为无线传感器网络设计的。

定向扩散路由机制包括周期性的兴趣扩散、梯度建立、数据传播、路径加强等阶段。

1. 兴趣扩散阶段

在兴趣扩散阶段，汇聚节点周期性地向邻居节点广播兴趣消息。兴趣消息中含有任务类型、事件区域、数据发送速率、时间戳等参数。每个节点在本地保存一个兴趣列表，对于每一个兴趣，列表中都有一个表项来记录该消息的邻居节点、数据发送速率和时间戳等任务相关信息，以建立该节点向汇聚节点传递数据的梯度关系。

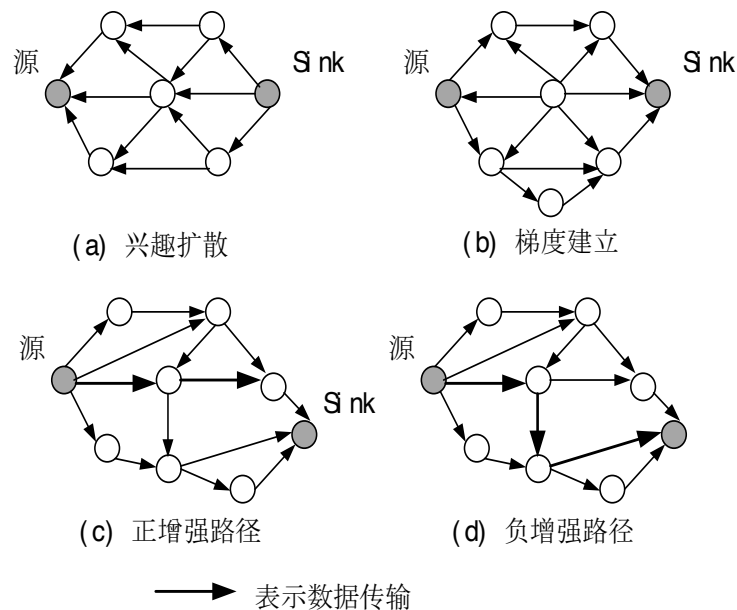
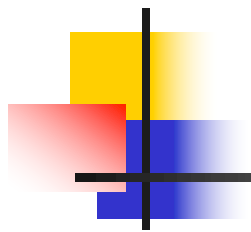


图 7-7 定向扩散路由机制



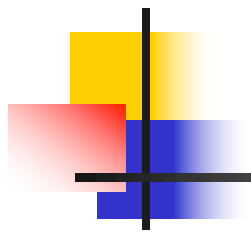
2. 梯度建立阶段

DD协议需要在传感器节点和Sink节点之间建立梯度，以保证可靠的传输数据。网络中的节点从邻居节点接收到一个兴趣消息时，无法判断此消息是否是已处理过的，或者是否和另一个方向的邻居节点所发来的兴趣消息相同，所以当兴趣消息在整个网络扩散的时候，相邻的节点彼此都建立一个梯度。这样的优点是加快了无效路径的修复，有利于路径的加强，从而不会产生持久的环路，但同时也导致了一个节点可能会收到多个相同的兴趣消息，造成消息在网络中的泛滥。



3. 数据传播阶段

当传感器节点采集到与兴趣匹配的数据时，把数据发送到梯度上的邻居节点，并按照梯度上的数据传输速率设定传感器模块采集数据的速率。由于可能从多个邻居节点收到兴趣消息，节点向多个邻居节点发送数据，汇聚节点可能收到经过多个路径的相同数据。中间节点收到其他节点转发的数据后，首先查询兴趣列表的表项。如果没有匹配的兴趣表项就丢弃数据；如果存在相应的兴趣表项，则检查与这个兴趣对应的数据缓冲区(数据缓冲区保存了最近转发的数据)。



如果在数据缓冲区中有与接收到的数据匹配的副本，说明已经转发过这个数据，为避免出现传输环路将丢弃这个数据，否则，检查该兴趣表项中的邻居节点信息。如果设置的邻居节点数据发送速率大于等于接收的数据速率，则全部转发接收的数据；如果记录的邻居节点数据发送速率小于接收的数据速率，则按照比例转发。对于转发的数据，数据缓冲区将保留一个副本，并记录转发时间。



4. 路径加强阶段

定向扩散路由机制通过正向加强机制来建立优化路径，并根据网络拓扑的变化修改数据转发的梯度关系。兴趣扩散阶段是为了建立源节点到汇聚节点的数据传输路径，数据源节点以较低的速率采集和发送数据，称这个阶段建立的梯度为探测梯度(**probe gradient**)。汇聚节点在收到从源节点发来的数据后，启动建立汇聚节点到源节点的加强路径，后续数据将沿着加强路径以较高的数据速率进行传输，加强后的梯度称为数据梯度(**data gradient**)。



7.5.2 谣传路由

谣传路由(**Rumor Routing**), 其路由的建立是由Sink节点和源节点共同发起并完成的。谣传路由借鉴了欧氏平面图上任意两条曲线交叉几率很大的思想, 当一个节点检测到一个事件, 它将事件增加到该节点自身保存的表单, 称为事件表。然后产生一个被称为代理(**agent**)的生命期较长的数据包, 代理消息沿着随机路径向外扩散传播, 同时汇聚节点发送的查询消息也沿随机路径在网络中传播。当代理消息和查询消息的传输路径交叉在一起时, 就会形成一条汇聚节点到事件区域的完整路径, 谣传路由的原理如图7-8所示。

圈中区域表示发生事件的区域，圆点表示传感器节点，黑色圆点表示代理消息经过的传感器节点，灰色圆点表示查询消息经过的传感器节点，连接灰色节点和部分黑色节点的路径表示事件区域到汇聚节点的数据传输路径。

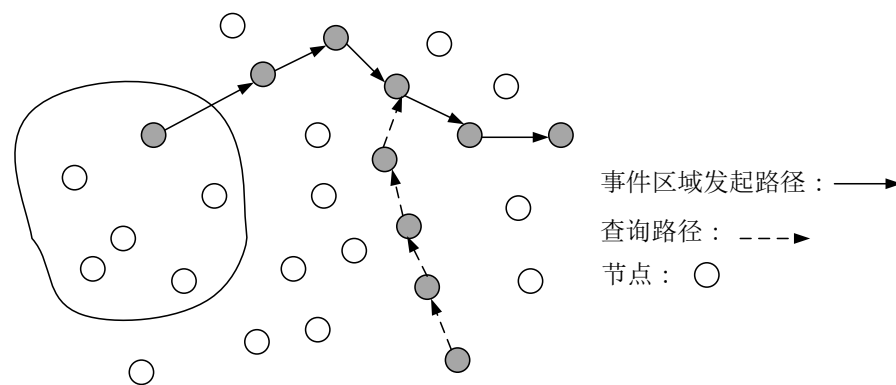


图 7-8 谣传路由机制



谣传路由协议的执行过程如下：

- ① 每个传感器节点维护一个邻居列表和一个事件列表。
- ② 当传感器节点在本地检测到一个事件时，就在事件列表中增加一个表项，设置相关的事件名称、跳数等，同时根据一定的概率产生一个代理消息。代理消息是一个包含生命期等事件信息的分组，用来携带相关的信息通告给它传输经过的每一个传感器节点。
- ③ 网络的任何节点都可以对一个特定的事件生成查询消息。
- ④ 若查询消息和代理消息的路径出现交叉的情况，交叉节点会沿着查询消息的反方向将事件信息传送到查询节点。如果查询节点在一段时间内没有收到事件消息，就认为查询消息并没有到达事件区域，可以选择重传、放弃或洪泛查询。



7.6地理位置路由

7.6.1 GEAR路由

1.GEAR路由的基本思想

GEAR采用查询驱动数据传送模式，根据事件区域的地理位置信息，建立基站或者汇聚节点到事件区域的优化路径，避免泛洪查询消息，从而减少了路由建立的开销。GEAR算法中提出，传感器网络中的数据经常包含了位置属性信息，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。

2. GEAR中查询消息的传播

(1) 查询消息传送到事件区域

GEAR路由用实际代价(learned cost)和估计代价(estimated cost)两种代价值来表示路径代价。GEAR通过如图7-9所示的方式来解决通信空洞问题，从而使路由进行下去。

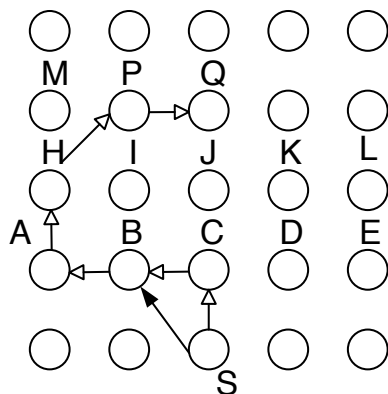


图 7-9 路由空洞和绕过空洞的路径

(2) 查询消息在事件区域内传播

当查询命令被转发进入事件区域后，大多数情况下采用递归的、基于地理信息的转发方式在事件区域内发布查询命令。如图7-10所示，假设大矩形就是事件区域，当路由查询命令转发到了位于事件区域内的 N_i 节点时， N_i 发现自己就在事件区域内，于是把事件区域分成4个小矩形区域，把查询命令向这4个子事件区域进行转发，在向子区域转发分组的时候同样遵循前面所讲的规则。重复这个区域划分和转发的过程，一直到满足停止转发的时候为止。

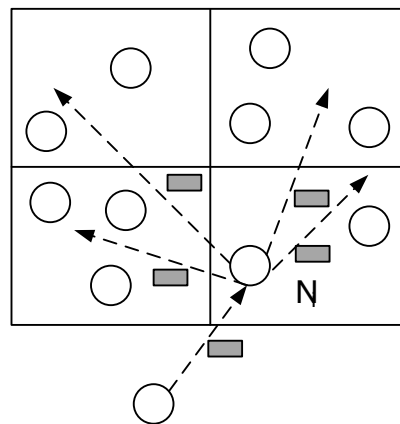


图 7-10 区域内的递归地理转发



(3)GEAR路由的性能

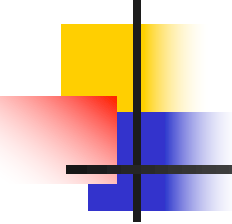
GEAR路由定义估计路由代价为节点到事件区域的距离和节点剩余能量，并利用捎带机制获取实际路由代价，进行数据传输的路径优化，从而形成能量高效的数据传输路径。GEAR路由采用的贪婪算法是一个局部最优的算法，适合无线传感器网络中节点只知道局部拓扑信息的情况，其缺点是由于缺乏足够的拓扑信息，路由过程中可能遇到路由空洞，反而降低了路由效率。如果节点拥有相邻两跳节点的地理位置信息，可以大大减少路由空洞的产生概率。GEAR路由中假设节点的地理位置固定或变化不频繁，适用于节点移动性不强的应用环境。



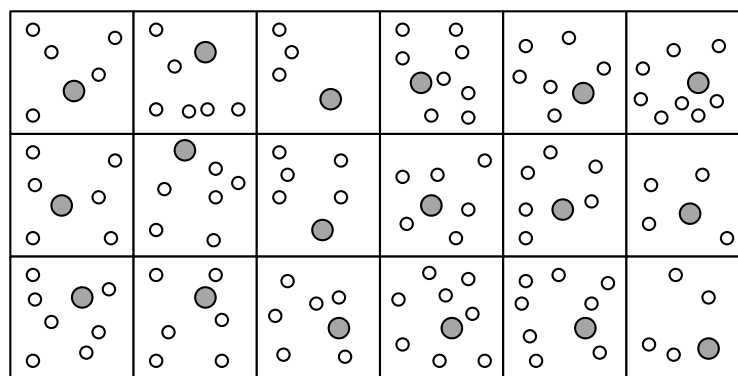
7.6.2 GAF路由

地域自适应保真算法GAF (Geographic Adaptive Fidelity)是基于有限能量和位置信息的路由算法，它原本是为移动Ad Hoc网络设计的，但同样可以应用于传感器网络，因为它的虚拟网格思想为分簇机制提供了新思路。GAF在不影响路由有效性的情况下，通过关闭不需要的节点来节省能量，同时还考虑了所有节点能量消耗的均衡性。

GAF协议中，网络被划分为若干固定区域，形成一个虚拟网格。节点通过GPS定位获取自己在网格中所处的“位置”，如果两个节点处在相同“位置”，则认为它们在路由时是等价的(分组转发能耗水平相等)。



等价节点中只需有一个处于工作状态，其余节点可以进入睡眠，GAF通过这种办法来节约能量，如图7-11所示，因此，GAF能够有效地延长网络的生命周期。



● 活动节点 ○ 睡眠节点

图 7-11 GAF协议虚拟网络

在图7-12中，节点2、3、4在同一个栅格B中，因此只需要保留其中一个节点处于工作状态，另外两个可以处于休眠状态。而这在Ad Hoc网络中是绝对不可取的，因为在Ad Hoc网络中，即使是同一个栅格内的多个节点，也还是代表了不同的移动终端，根本不能相互代替。但在WSN中，这就是一个优点，相当于用1个节点代表了3个节点，类似于层次路由中的簇头节点，但这个类似于簇头的代表节点却不进行栅格内的数据融合。节点间的数据通信只能在相邻栅格间进行，即A栅格内的节点1只能与B栅格内的2、3、4代表节点通信，而不能直接和C栅格内的节点5通信。

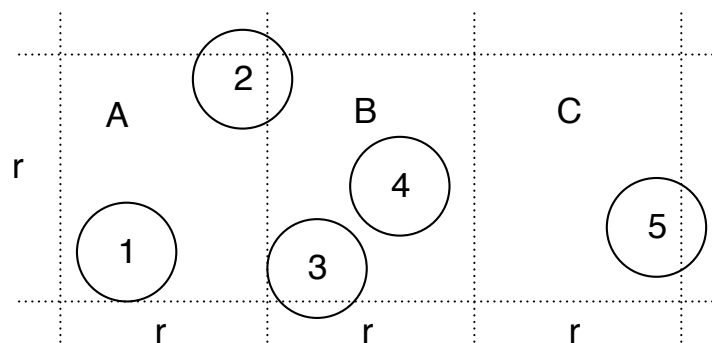


图 7-12 GAF的虚栅格结构



GAF算法的执行过程包括两个阶段。

第一阶段是虚拟网格的划分。根据节点的位置信息和通信半径，将网络区域划分成若干虚拟网格，保证相邻单元格中的任意两个节点都能够直接通信。假设节点已知整个监测区域的位置信息和本身的位置信息，节点可以通过计算得知自己属于哪个网格。

第二阶段是虚拟网格中簇头节点的选择。节点周期性地进入睡眠和工作状态，从睡眠状态唤醒之后与本单元其他节点交换信息，以确定自己是否需要成为簇头节点。

每个节点处于发现(discovery)、活动(active)以及睡眠(sleeping)3种状态，如图7-13所示。

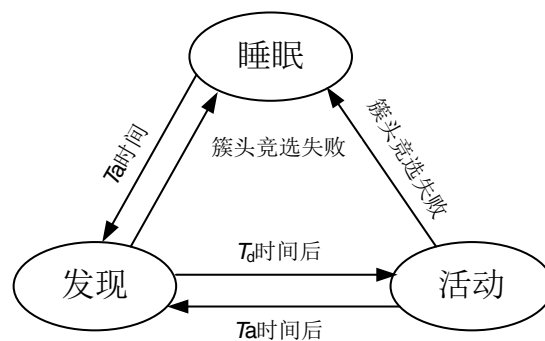
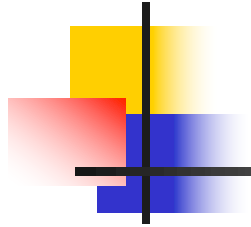


图 7-13 节点状态



The end