



第8章 无线传感器网络



主要内容



- 8.1 什么是无线传感器网络
- 8.2 无线传感器网络的体系结构
- 8.3 无线传感器网络的特点
- 8.4 无线传感器网络的应用
- 8.5 无线传感器网络的MAC协议
- 8.6 无线传感器网络的路由协议
- 8.7 无线传感器网络的拓扑控制
- 8.8 无线传感器网络的定位技术
- 8.9 无线传感器网络的时间同步机制
- 8.10 无线传感器网络的安全技术
- 8.11 无线传感器网络的数据管理
- 8.12 无线传感器网络的数据融合

8.1 什么是无线传感器网络



无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)是由部署在监测区域内大量的廉价微型传感器节点组成,通过无线通信方式形成的一个多跳的自组织的网络系统,其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域中感知对象的信息,并发送给观察者。

无线传感器网络是信息世界和物理世界的融合。

传感器网络三大要素：传感器、感知对象和观察者

传感器感测的事件



- ☐ 温度
- ☐ 湿度
- ☐ 车辆的移动
- ☐ 光照条件
- ☐ 压力
- ☐ 土壤结构
- ☐ 噪声级别
- ☐ 某类物体的出现和消失
- ☐ 连接物体的机械应力级别
- ☐ 物体的当前特征（速度、方向、大小等）

无线传感器网络查询分类



- ❑ 历史查询(historical query)
 - 用来分析存在基站上的历史数据
- ❑ 一次查询(one-time query)
 - 获得网络的瞬间视图
- ❑ 持续查询(persistent query)
 - 监控某段时间内的一些物理参数

实例：分布在工厂的温度传感器

- ◇ 过去2小时温度介于40~90度之间的区域
- ◇ 当前的平均温度是多少
- ◇ 当某个区域温度高于40度时立即报告

无线传感器网络分类



□ 先应式网络

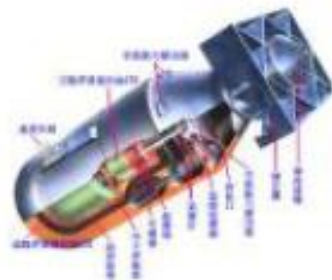
- 连续操作模式（**Continuously Operating Model**）
- 节点定期打开传感器和发送器、感测环境并将感性需的数据发送出去
- 适用于需要定期监测数据的应用

□ 反应式网络

- 查询-响应模式（**Query-Response Model**）
- 节点根据用户发来的查询命令给予立即响应
- 节点根据网络某些属性值发生的变化立即予以响应

8.4 无线传感器网络的应用-军事

- ❑ 监督我方军力、装备和弹药
- ❑ 侦查敌方军力和地形
- ❑ 战场监督
- ❑ 战斗损伤评估
- ❑ 智能导弹的制导系统
- ❑ 原子弹、生物弹以及化学弹等大杀伤性进攻的检测和侦查



无线传感器网络的应用-环境



- ❑ 森林火险监测
- ❑ 洪水监测
- ❑ 精确农耕
- ❑ 环境的生物复杂性地图



无线传感器网络的应用-居家



□ 居家自动化

○ 微波炉

○ 冰箱

○ 吸尘器

○ 所有家电协同工作并可远程控制



□ 智能居住环境（可自适应用户的个人喜好）

○ 光线强度

○ 音乐

○ 房间气氛



无线传感器网络的应用-商业

❑ 办公楼的环境控制

- 不同部分的空气流动和温度自动控制



❑ 交互式博物馆

❑ 管理存货控制

- 通过每个货品上的传感器跟踪移动来提高仓库管理性能



❑ 车辆跟踪和检测

❑ 监测和监控车辆偷盗



无线传感器网络的应用-健康

❑ 远程监控人体的生理数据（心脏速率、血压）

- 采集的数据通过网络送到负责病人的主管医生
- 病人获得极大的行动自由度



❑ 跟踪和监督医院内的病人和医生

❑ 医院的药物管理

❑ 正确地识别病人的敏感反应避免误诊



无线传感器网络与有线传感器网络

□ 易于部署

- 随机部署在感兴趣的地方而无需事先规划
- 降低安装成本和增加部署灵活性

□ 范围扩展

- 许多分布的小型无线传感器覆盖的范围超过一个有线传感器的覆盖范围

□ 容错能力

- 单个传感节点的故障不会影响网络的性能（临近节点感测的数据类似）

□ 移动性

- 节点可进行重新分布以便分布均匀（相对ad hoc节点的移动速度慢）

8.3 无线传感器网络特性



1. 大规模网络（密集分布在很大的地理区域）

更大信噪比、更高的数据精确度、更强容错性、更少的监测盲区

2. 自组织网络（拓扑结构动态变化）

3. 动态性网络（节点故障、带宽变化、移动性以及新节点加入）

4. 可靠的网络（节点不易被破坏及信息盗取和伪造）

5. 应用相关的网络

6. 以数据为中心的网络

节点采用节点编号标识且动态配置
用户不关心具体采集信息节点，只关心监测对象

无线传感器网络特性（续）



❑ 传感节点没有全局ID

- 以数据为中心，不需要往来特定节点的路由；
- 传感节点数目巨大所需的ID往往超过传输的数据；

❑ 临近的传感节点拥有相似的数据

- 不需要每个节点发送数据
- 需要节点具备数据汇聚能力



◇ 带宽消耗
◇ 介质访问延迟
◇ 能量消耗

❑ 传感网络特定于应用

- 节点是否移动
- 数据是否基于固定属性

MANET路由协议不适用于WSN!

无线传感器网络特性（续）



❑ 基于属性的地址

- 由描述特定物理参数的属性值序列组成

❑ 位置感知

- 多数数据搜集基于位置
- 节点需要了解自己的位置

❑ 节点应对环境的激烈变化作出立即反应

- 有效利用有限无线信道带宽和电池能量以最小延迟让用户及时感知异常情况的发生

❑ 具备查询控制能力

- 用户手持设备向基站或者附近的传感节点查询数据
- 必须有可靠的机制确保查询命令到达恰当的节点和节点逆向回答到手持设备用户

无线传感器网络面临的问题和挑战

❑ 传感节点是随机分布的

❑ 传感网络是无架构的

❑ 传感节点的最大瓶颈是可用的能量

○ 电池供电且往往无法充电

○ 要求能量消耗均匀→延长整个网络的寿命

❑ 传感节点的硬件设计要考虑能量效率

❑ 传感节点应能以完全分布式方式与其他节点保持同步

❑ 传感网络应能具有自适应网络连接变化的能力

❑ 传感网络必须具备实时通信能力

❑ 传感网络应支持安全通信

○ 网络的建立和维持完全自治

○ 所有路由/维护算法都是分布式

设计目标与性能度量



□ 设计目标

- 可扩展性
- 自配置能力
- 资源感知
- 网络寿命
 - ✧ 协议的设计必须均匀消耗节点能量
- 容错能力

□ 性能度量

- 网络寿命
 - ✧ 网络开始运行到第一个节点死掉这段时间
- 延迟
 - ✧ 传感节点开始发送数据到基站收到数据这段时间
- 每单位能分发数据的质量和数量

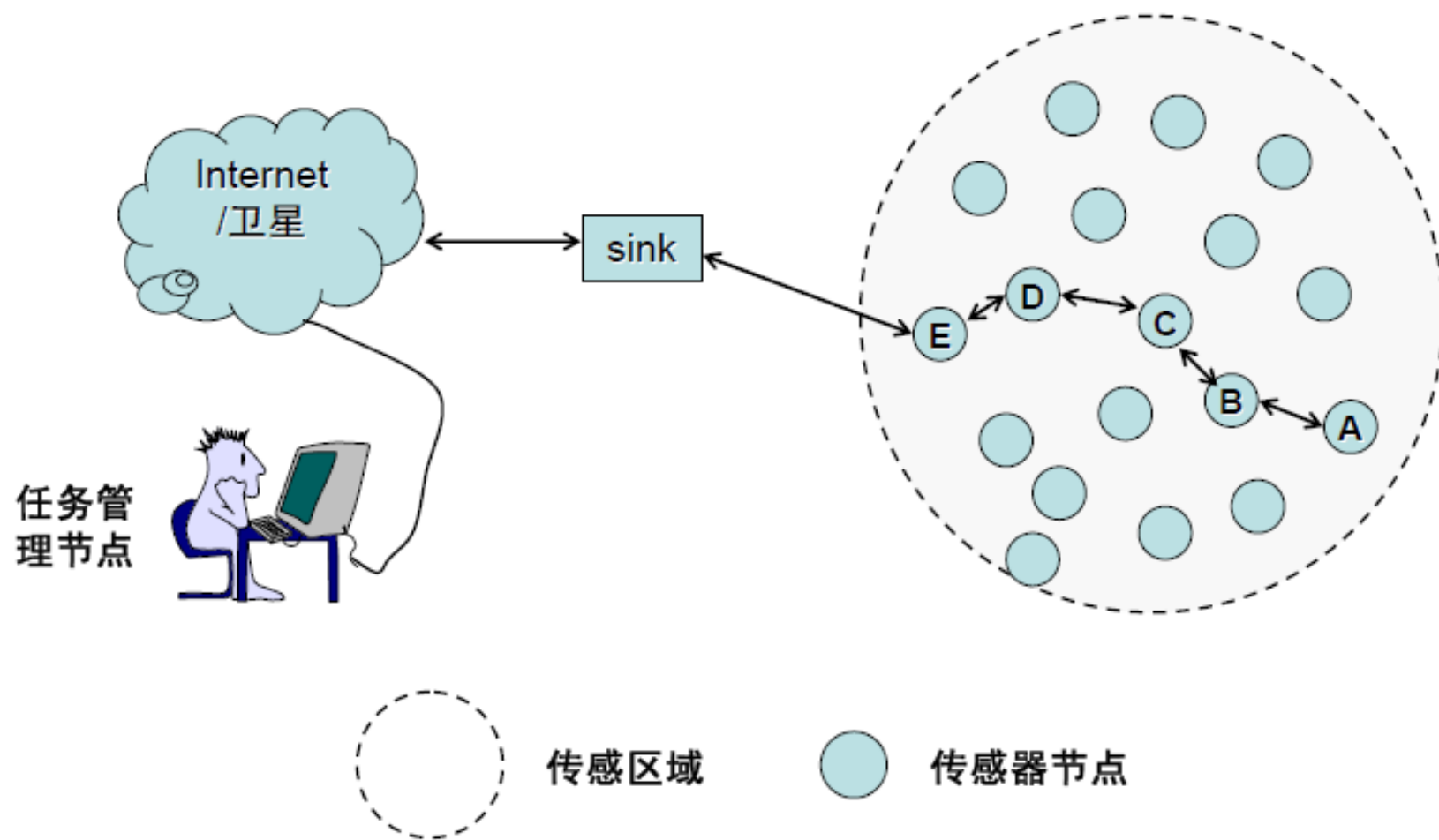
8.2 无线传感器网络的体系结构



1. 网络结构

- 无线传感器网络系统通常包括**传感器节点**、**汇聚节点**和**管理节点**。
- 大量传感器节点随机部署在监测区域内部或附近，通过自组织方式构成网络。
- 传感器节点监测的数据逐跳传输至汇聚节点，在传输过程中数据可能被多个节点处理，最后通过互联网或卫星到达管理节点。
- 用户通过管理节点对传感器网络进行配置和管理，发布监测任务以及收集监测数据。

传感器网络通信体系结构

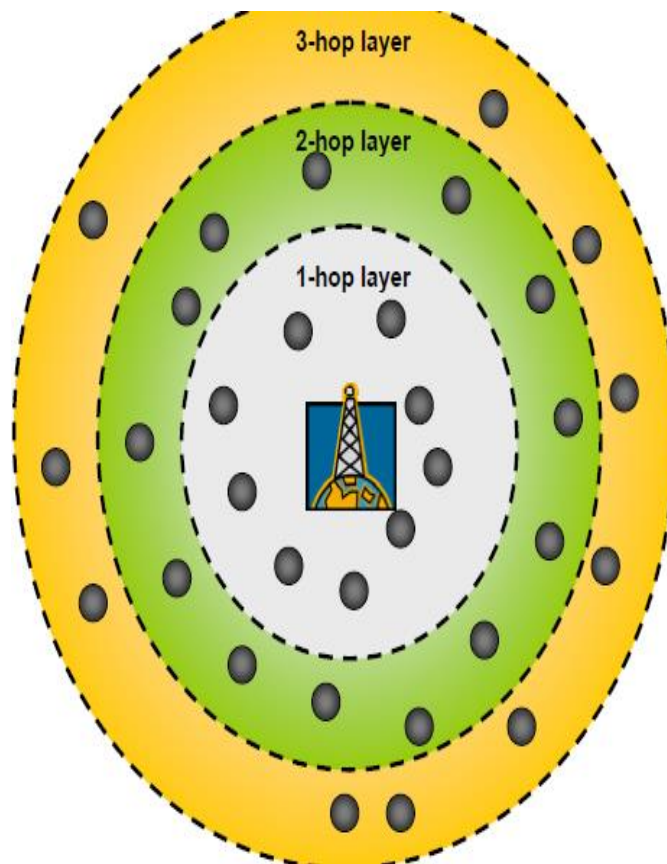


传感器网络层次体系结构-UNPF



Unified Network Protocol Framework

- 一组完全实现层次体系结构的协议
- 协议由三个操作组成
 - ◇ 网络初始化和维护协议
 - ◇ MAC协议
 - ◇ 路由协议



- 由一个强大的基站 (BS) 和围绕它的一系列传感节点组成
- 与BS跳数相同的节点位于同一层次

UNPF-网络初始化和维护

❑ 目的

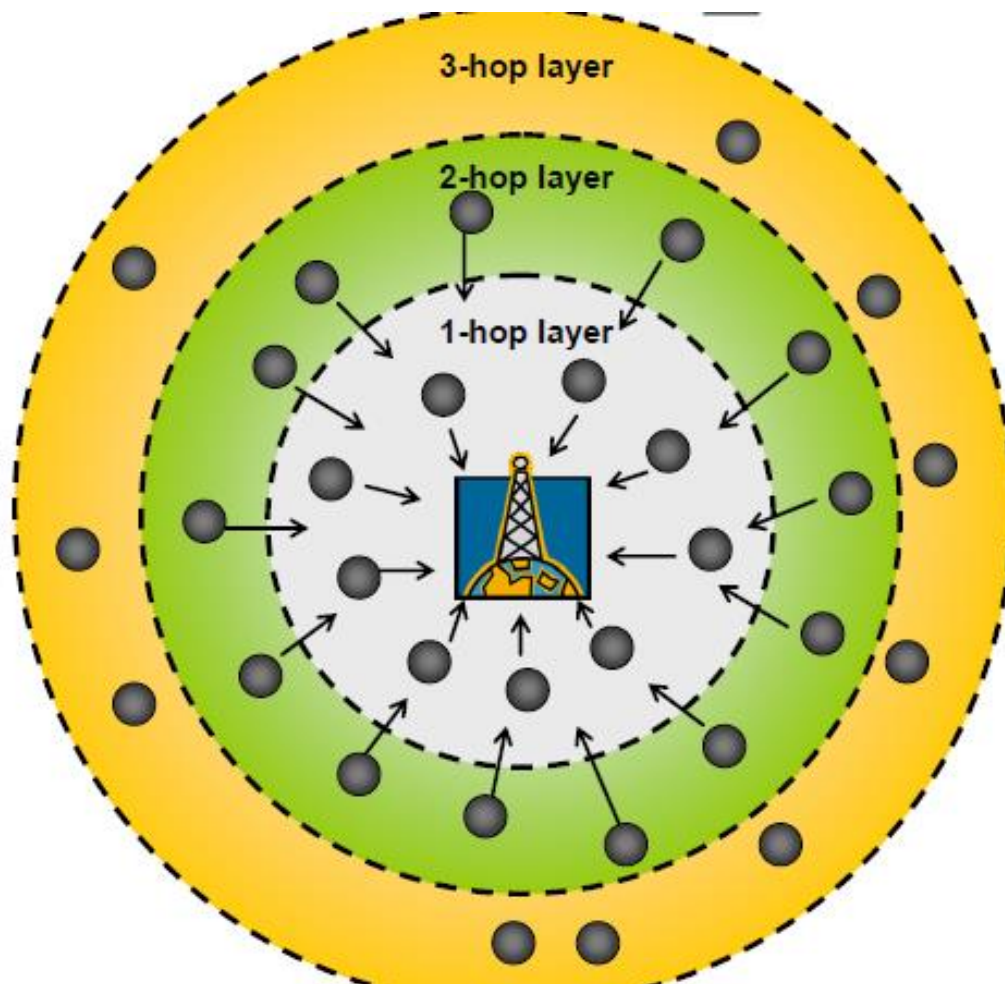
- 将传感节点组织到不同层次

❑ 前提

- BS能量足够大到一次发送到达所有节点

❑ 构造

- 通过BS广播和节点以beacon响应的方式构造

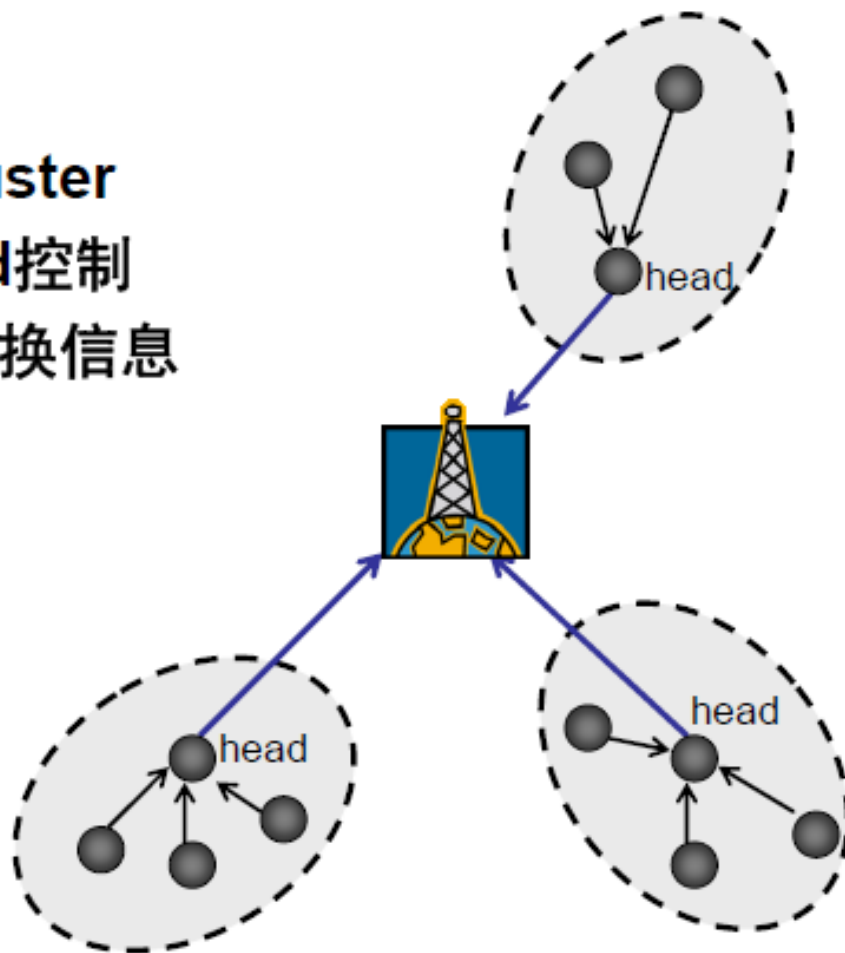


传感器网络层次体系结构-分簇

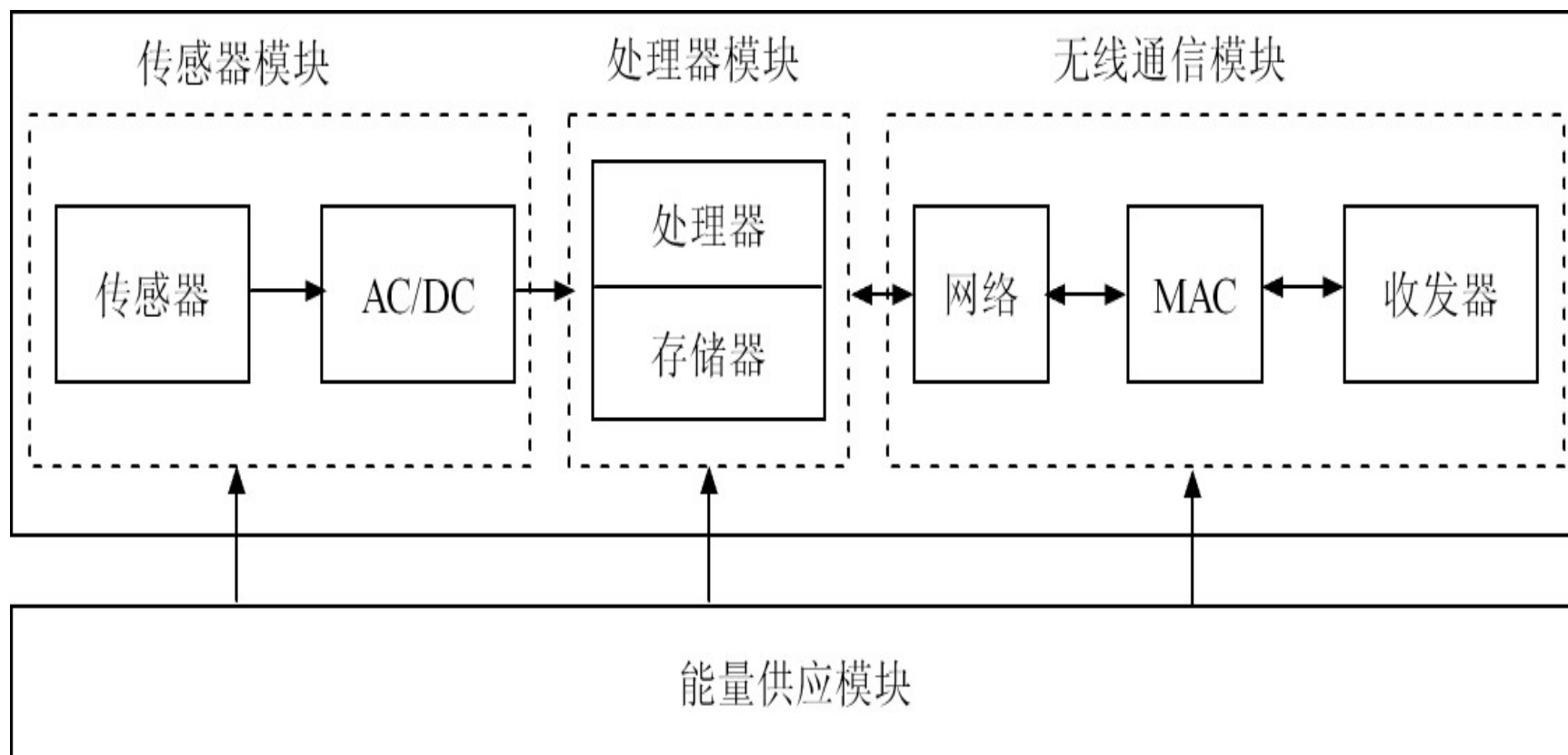
分簇体系特点

- 传感节点组成一个个cluster
- 每个cluster由一个head控制
- 每个节点与各自head交换信息
- Head与BS交换信息
- BS与有线网络连接

任何消息发送到BS
至多2跳。



2. 传感器节点结构

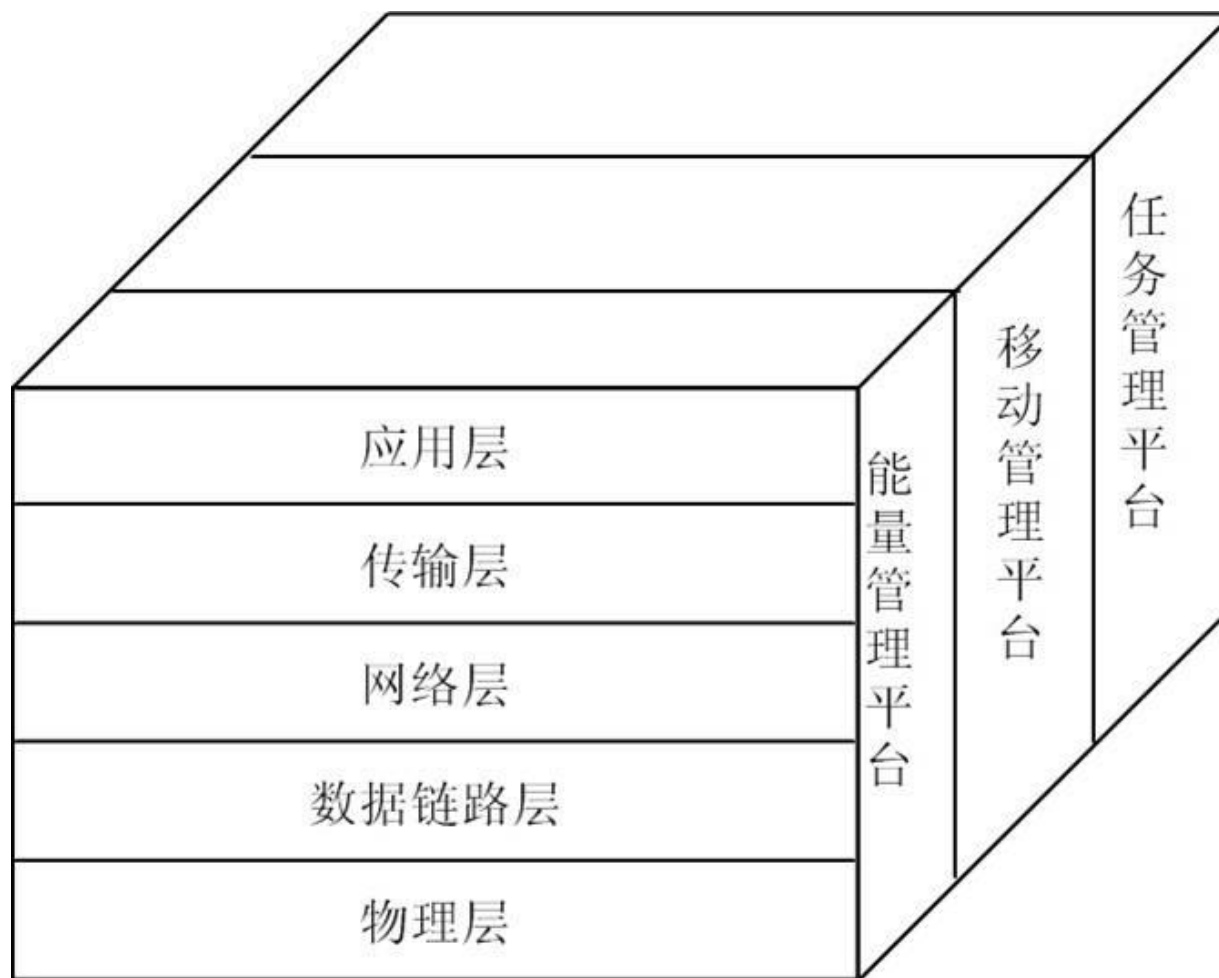


传感器节点模块



- **传感器模块**负责监测区域内信息的采集和数据转换；
- **处理器模块**负责控制整个传感器节点的操作，存储和处理本身采集的数据以及其他节点发来的数据；
- **无线通信模块**负责与其他传感器节点进行无线通信，交换控制消息和收发采集数据；
- **能量供应模块**为传感器节点提供运行所需的能量，通常采用微型电池。

3. 协议栈-早期模型



(a)

协议栈-网络层

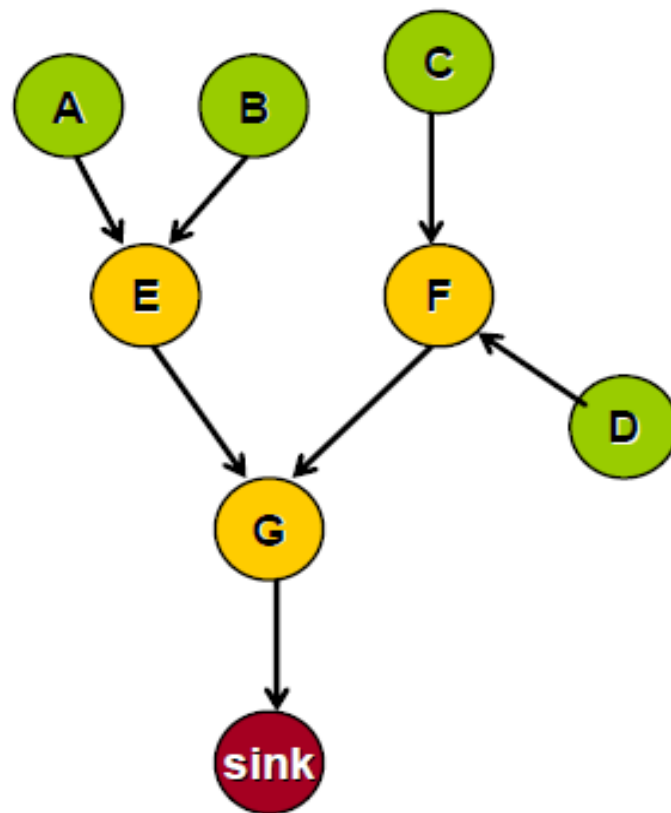
负责路由生成与路由选择

□ 网络层

- 节能总是最重要的考量
- 传感网络多数以数据为中心
- 数据聚合不能影响传感节点的协同
- 理想的传感器网络基于属性寻址并能感知位置

□ 开放问题的研究

- 新协议更适应拓扑动态变化和高扩展性
- 网络互联模式应能易于传感网络与外部网络的通信



协议栈-数据链路层



❑ 数据链路层

- 负责介质访问和差错控制
- 确保通信网络中的点-点和点-多点连接

❑ 介质访问控制

- 创建网络架构
- 在传感节点之间公平有效地共享通信资源

❑ 差错控制

- 前向纠错 (FEC)
- 自动重发检错 (ARQ)

❑ 开放研究问题

- 移动传感器网络的MAC
- 确定传感网络自组织所需的最低能量门限
- 差错控制编码模式
- 节能操作模式

协议栈-管理平台

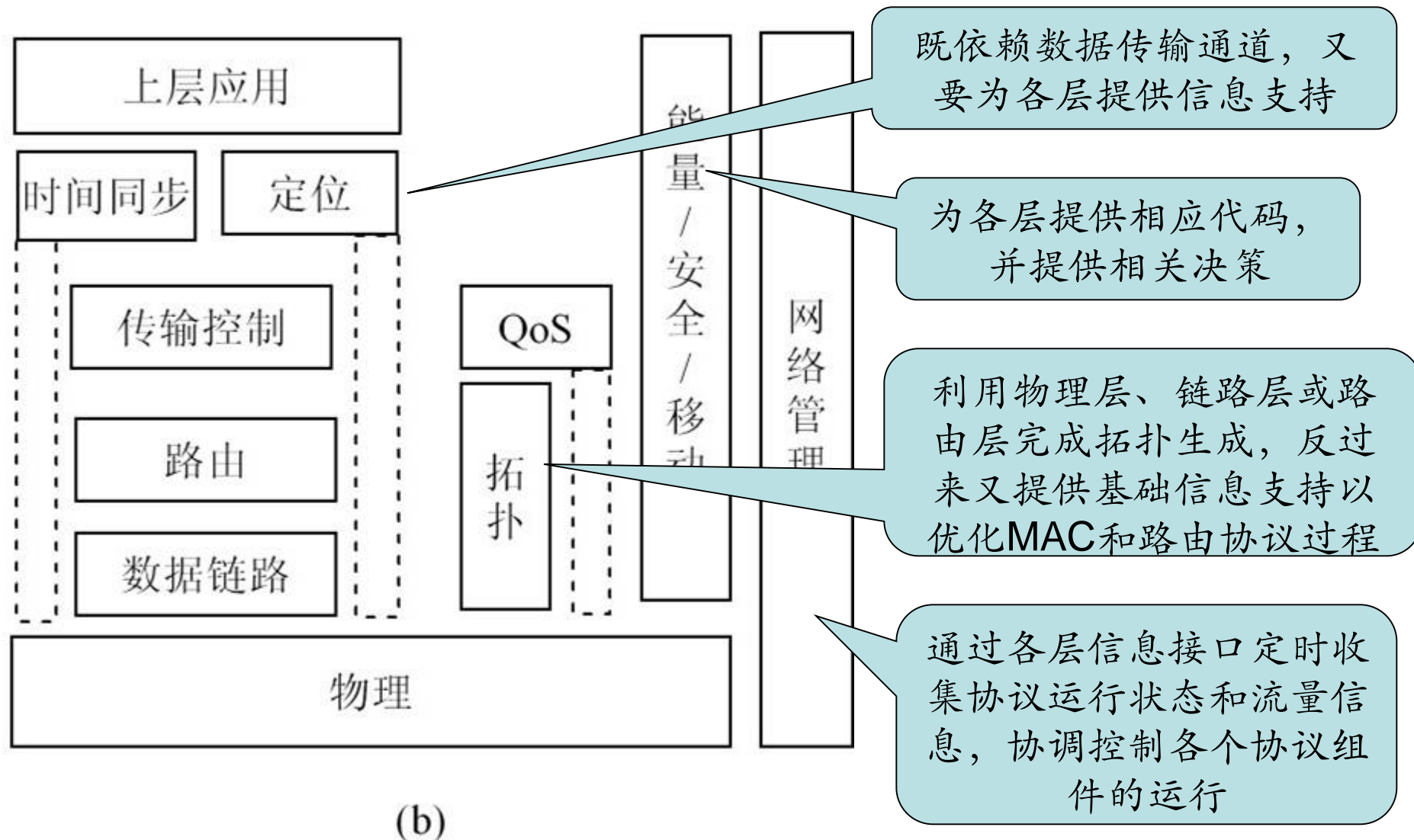


能量管理平台：在各个协议层管理节点如何使用能源

移动管理平台：检测并注册节点移动，维护到汇聚节点的路由，使节点能动态跟踪其邻居位置。

任务管理平台：在给定区域内平衡和调度检测任务。

3. 协议栈-改进模型



8.5 无线传感器网络的MAC协议

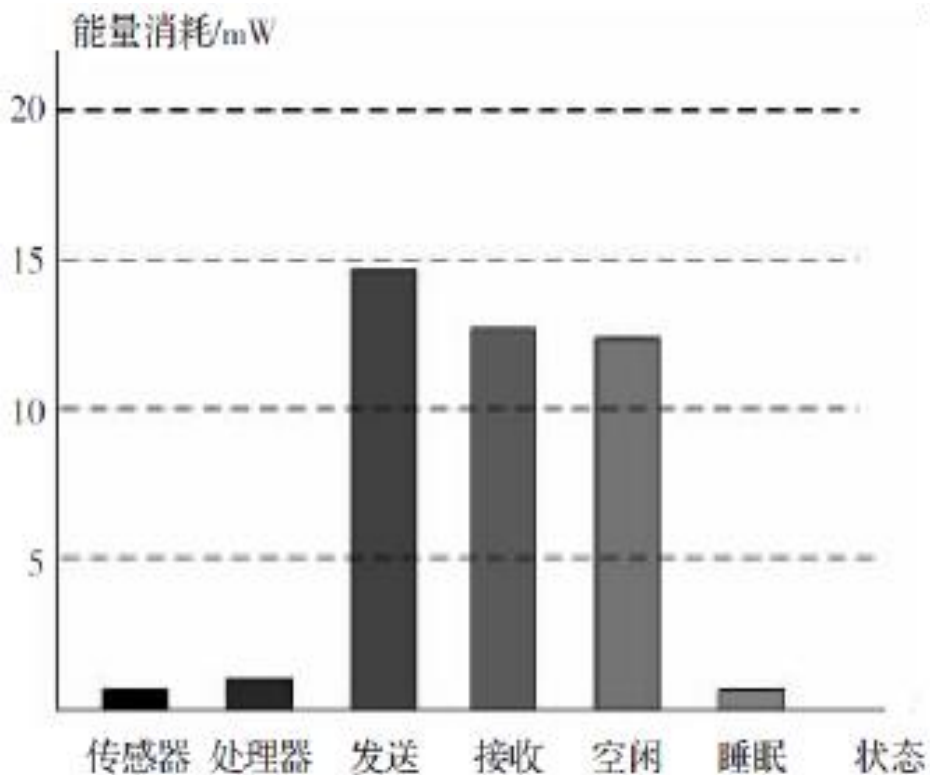


- MAC协议对无线传感器网络的性能有较大影响，是保证无线传感器网络高效通信的关键网络协议之一。
- 无线传感器网络的强大功能由众多节点协作实现。
- 多点通信在局部范围需要MAC协议协调其间的信道分配，在整个网络范围内需要路由协议选择通信路径。
- 设计无线传感器网络MAC协议需要着重考虑的问题：
 - (1) 节省能量 （应对有限的能量供应）
 - (2) 可扩展性 （应对动态拓扑结构）
 - (3) 网络效率 （公平性，实时性、吞吐率等）

可能造成网络能量浪费的主要原因

- 如果MAC协议采用竞争方式使用共享无线信道，可能会引起多个节点之间发送的**数据产生碰撞**，导致重传消耗节点更多的能量。
- 节点**接收并处理不必要的数据**。
- 节点在不需要发送数据时一直保持对无线信道的空闲侦听，以便接收可能传输给自己的数据。**过度的空闲侦听或者没必要的空闲侦听**同样会造成节点能量的浪费。
- 在控制节点之间的信道分配时，如果**控制消息过多**，也会消耗较多的网络能量。

节省网络能量的主要方法



传感器节点能量消耗情况

当数据收发，开启无线通信模块

如无数据需求，则进入睡眠状态

节点间协调睡眠和侦听周期，同时唤醒或睡眠，避免过度侦听或错过数据

MAC协议分类标准



- 采用分布式控制还是集中控制
- 使用单一共享信道还是多个信道
- 采用固定分配信道方式还是随机访问信道方式
 - (1) 采用时分复用方式，给每个传感器节点分配固定的无线信道使用时段，从而避免节点之间的相互干扰。包括基于分簇网络的MAC协议、基于周期性调度的协议等。
 - (2) 采用随机竞争方式，节点在需要发送数据时随机使用无线信道，重点考虑尽量减少节点间的干扰。包括S-MAC、T-MAC、SIFT、IEEE802.15.4MAC协议等。
 - (3) 采用确定性接入方式，如协议序列，拓扑透明控制码以及冲突避免码等。

8.6 无线传感器网络的路由协议



负责将数据分组从源节点转发到目的节点：
寻找节点之间的优化路径；
将数据分组沿着优化路径正确转发。

传统无线网络路由协议特点：

- (1) 最小化通信延迟
- (2) 提高网络利用率
- (3) 避免拥塞并均衡网络流量

无线传感器网络路由协议特点：

- (1) 能量优先
- (2) 基于局部拓扑信息
- (3) 以数据为中心
- (4) 应用相关

设计无线传感器网络路由机制的要求

- (1) 能量高效：能量消耗小且均衡
- (2) 可扩展性：适应动态拓扑结构
- (3) 鲁棒性：具有容错能力
- (4) 快速收敛性：减少通信协议开销，提高传输效率

路由协议分类



根据不同应用对传感器网络各种特性的敏感度不同，
可以将路由协议分为四种类型：

(1) **能量感知路由协议。**

如能量路由算法和能量多路径路由算法。

最小化查询节点
和传感器节点之
间的通信流量

(2) **基于查询的路由协议。**

如定向扩散路由协议和Boulis等人提出的谣传路由协议。

(3) **地理位置路由协议。**

如GEAR路由协议、GEM路由协议和基于边界定位的地理路由协议。

需要知道节点的地理
位置以降低维护
路由协议的能耗

(4) **可靠的路由协议。**

数据分发



数据分发 (Data dissemination)：传感网络中路由查询包和数据包的过程

□ Source

○ 产生数据的节点

□ Sink

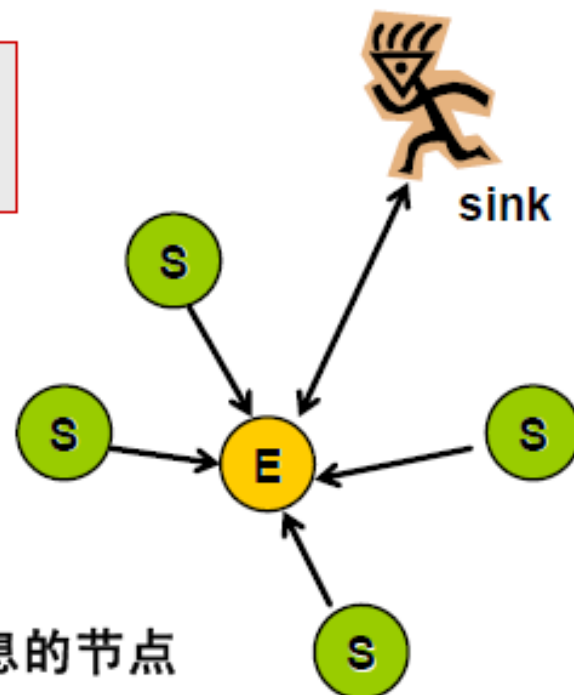
○ 对某个事件感兴趣并寻找有关该事件信息的节点

□ Event

○ 报告的信息

□ Interest

○ 节点对某类感兴趣数据或者事件的描述



定向扩散协议-路由协议实例



□ 应用场景

- 任何节点都可产生请求/查询传感数据
- 所有查询不仅是BS发出

□ Sink

- BS
- 传感节点

□ Directed diffusion协议

- 通过interest和gradient来改进数据分发性能

定向扩散协议特点



- ❑ 以数据为中心的路由；
- ❑ 采用查询-响应操作模式；
- ❑ 某个节点(sink)广播一个查询消息 (Interest) ；
- ❑ 查询消息经扩散到达满足查询条件的节点 (sources) ；
 - 该扩散过程兼顾建立探测性质的网络gradients；
- ❑ 一旦sources有可用数据便通过reinforced路径把数据发回给sink；
- ❑ 使用Reinforcement和否定reinforcement来汇聚分发；
- ❑ 中间节点见机融合interest、聚合、关联或者缓存数据；

定向扩散协议的元素



□ 定向扩散的组成元素

- 数据以 (attribute, value) 命名;
- 传感任务以 interest 分发至全网;
- 分发过程建立 gradient 用于传输 event
 - ✧ —— 与 interest 匹配的数据;
- Event 沿着多条路径流向 interest 的发起者 sink;
- 传感网络 reinforce 这些路径中的一条或少量几条;

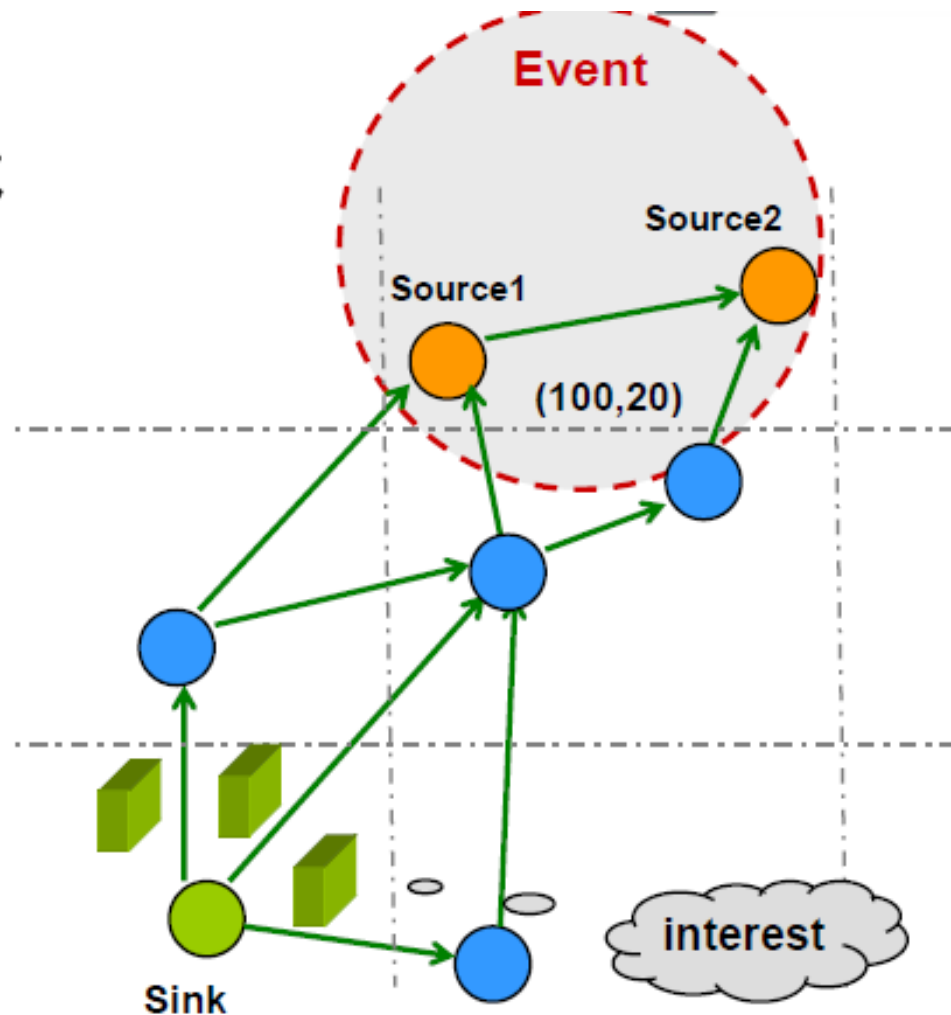
兴趣 (Interests) 表述



- ❑ Interest (type, interval, duration, rect)
 - 按照命名规则描述的任务
- ❑ Sink
 - 将interest注入网络的节点
- ❑ Sink为每个活跃的任务周期性地广播interest给邻居
 - 初始interest的interval取较大值
 - 作为探测网络中是否存在能检测到4脚动物的传感节点

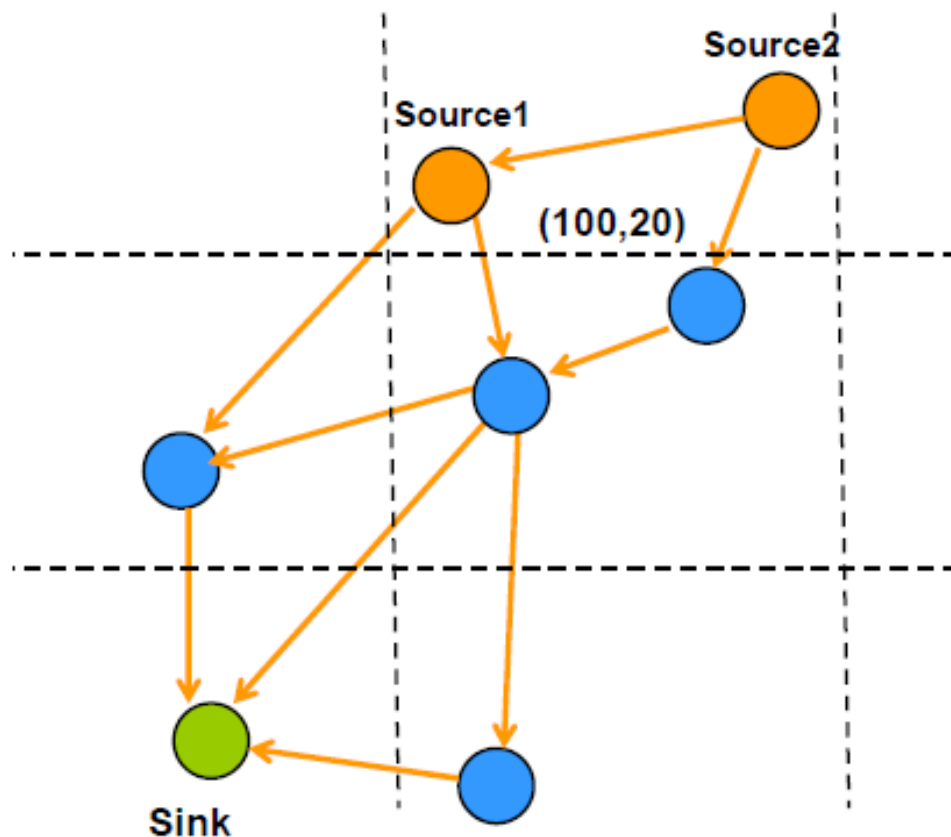
Interest的传播

- ❑ “告诉我在(100,20)区域内4脚动物的位置”
- ❑ (100,20)区域内的节点收到interest后立即启动传感器收集有关4脚动物的数据;
- ❑ 收集到的有关4脚动物位置信息沿着interest传播的逆向路径返回;



路径梯度

❑ Gradients的建立是为查询数据的返回作准备;



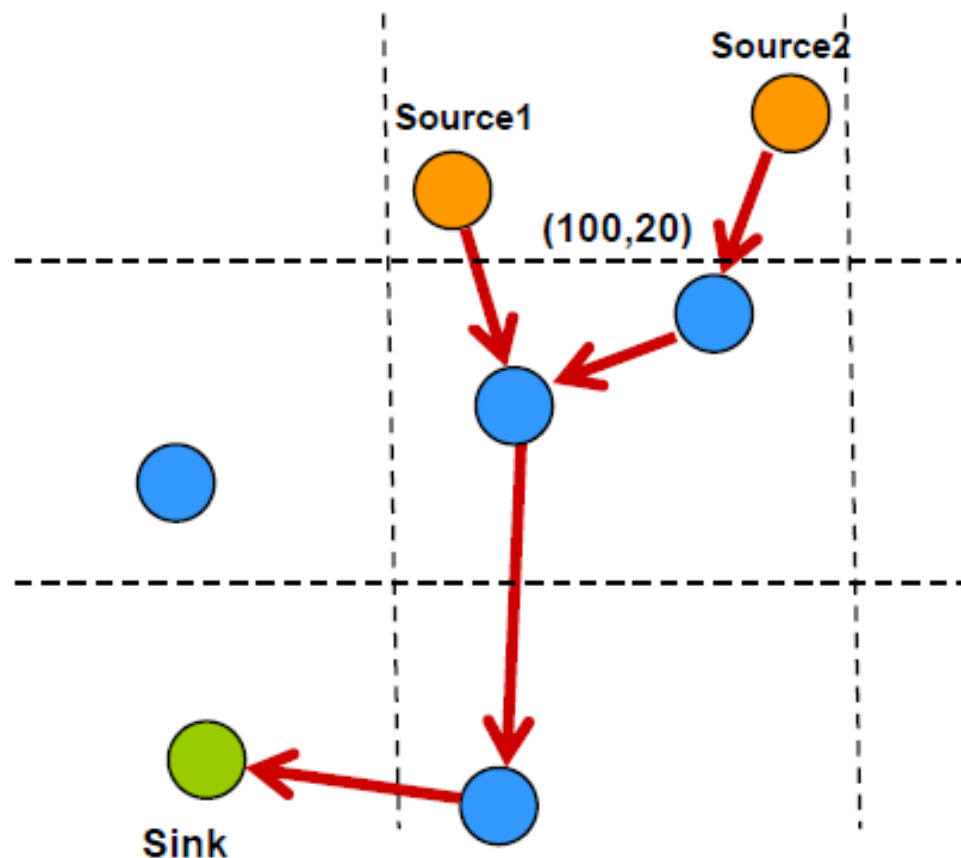
导出

- 每条路径与一个“梯度”有关
- “梯度”在interest传播时建立
- “梯度”可从interest指定的时间间隔”或者“数据率”字段

加强路径

❑ 数据传输使用的是reinforced路径;

○ 加强路径指沿着一条特定的
路径更新某个节点的interest
○ 对于监测到某个时间的节点
应该更频繁地报告数据（只要
增加该路径的梯度）



8.7 无线传感器网络的拓扑控制



拓扑结构控制与MAC层和路由层的关系：

- 拓扑控制作为传感器网络重要的支撑技术，主要作用是在MAC层和路由层之间，为减少通信干扰提高MAC协议效率提供基础，为路由层提供足够的路由更新信息；
- 路由表的变化反作用于拓扑控制，MAC层也可作为拓扑控制算法提供邻居发现等消息。拓扑控制同时为网络时间同步、数据融合及目标定位等关键技术提供支撑。

8.7 无线传感器网络的拓扑控制



网络的拓扑结构控制与优化的意义：

- 影响整个网络的生存时间。
- 利用功率控制技术减小节点间干扰，提高通信效率。
- 通过确定转发节点和邻居关系为路由协议提供基础。
- 通过数据融合节点的选择影响数据融合。
- 弥补节点失效的影响。

拓扑控制算法设计要求



- 从简化路由、提高MAC协议效率来讲，生成的拓扑应具备**稀疏性和对称性**；
- 从消息转发的可达性和可扩展性的角度来讲，拓扑应具备**平面性和局部性**；
- 从实现节点间互相通信和健壮性的要求考虑，拓扑结构必须具备**连通性和容错性**。
- 在设计拓扑时要结合场景的实际需要，应在稀疏性、对称性、连通性等这些错综复杂的关系中**折中**，并结合算法本身的实现代价综合考虑。

拓扑控制研究主要问题



在满足覆盖度和连通度的前提下，通过功率控制和骨干网节点选择，剔除不必要的通信链路，以形成数据转发的优化网络结构。

节点功率控制：

- (1) 调节节点发射功率为手段
- (2) 满足网络连通度为前提
- (3) 均衡邻居数目为目标

层次性拓扑结构组织：

- (1) 构建层次性结构
- (2) 形成数据转发链路
- (3) 引入睡眠机制



❑ Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy

- Proactive协议
- 连续操作模式
- Cluster head与BS直接通信
- Cluster head的选择是周期性进行(round)
- 每个节点以一定概率成为head
 - ✧ → 均衡作为head的能量损耗
- Cluster内部节点采用TDMA
- 协议由交替进行的“建立”和“稳定”两个阶段组成

LEACH建立阶段

- ❑ 每个节点 $n \in G$ 随机选择一个数 $k \in (0 \sim 1)$;
- ❑ 如果选择数低于 $T(n)$, 则该节点成为 head;

$$T(n) = \frac{P}{1 - P * \left(r \bmod \left(\frac{1}{P} \right) \right)}$$

- ❑ 所有被选为 Head 的节点通告全体节点;
- ❑ 所有收到通告的节点根据信号强度就近选择一个 head;
- ❑ Head 为自己的 cluster 成员指定 TDMA 调度;

一次迭代选举 cluster head 的过程称为 round

G: 没有做过 head 的节点集合
P: 需要 head 的百分比
r: 当前 round

LEACH稳定阶段



- ❑ 该阶段将持续相当长一段时间
 - 节约重组cluster的开销;
- ❑ 每个节点采用TDMA方式把数据发给head;
- ❑ Head融合/集成收到的数据后发给BS;
- ❑ BS只接受来自head的聚合后数据;
 - 保存能量
- ❑ 一定时间后再次进入setup阶段重新选择head;

❑ Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems

- 所有节点都不移动;
- 所有的传感节点知道彼此的位置;
- 被选为head的节点与BS的传输一跳就能完成;

❑ 与LEACH比较

- LEACH通过head融合cluster成员的数据来改进性能; 但所有节点只能和head直接通信;
- PEGASIS的节点通过链与最近的邻居通信;

PEGASIS设计目标



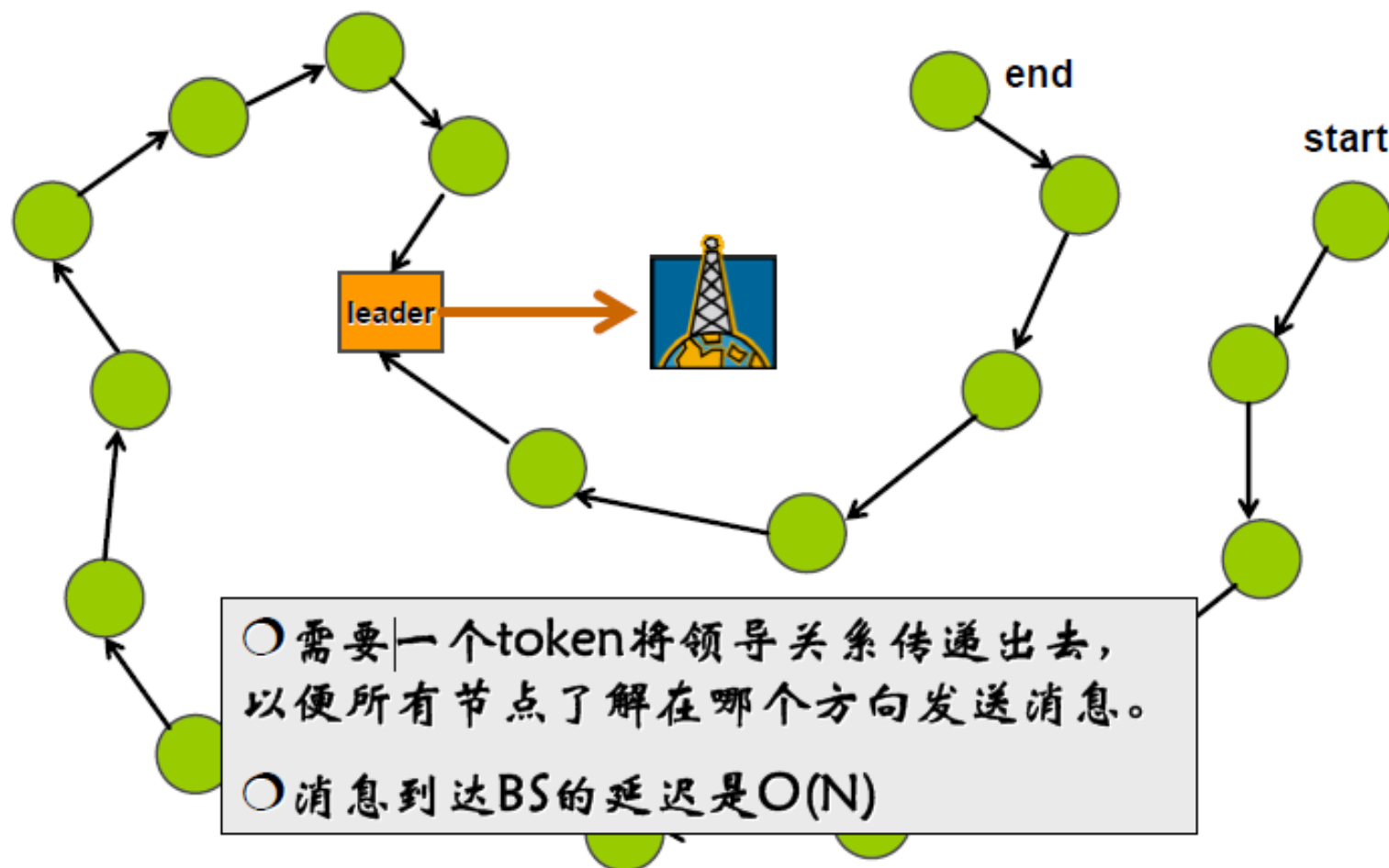
- ❑ 最小化每个节点的传输距离;
- ❑ 最小化广播开销;
- ❑ 最小化需要发给BS的消息数量;
- ❑ 能量消耗均匀分布在所有节点;



- ❑ 采用greedy算法构造一个始于最远节点的传感节点 chain
 - Chain的构造是一次加入一个最近的邻居;
 - Leader节点发出一个控制token来启动chain末端的数据传输;
 - 每个节点都执行数据融合/聚合;
 - 由chain聚合的数据最终通过leader发给BS;
 - Leader的选择是随机的;

Greedy: 在贪婪算法中采用逐步构造最优解的方法

PEGASIS数据搜集





✓ 优点

- (1) 减少了LEACH的簇重构开销，
- (2) 通过数据融合降低了收发过程的次数，
- (3) 降低了能量的消耗。仿真表明：与LEACH相比，PEGASIS能够提高网络的生存周期近2倍

✓ 缺点

- (1) 假定每个节点能够直接与汇聚节点通信。
- (2) 假定所有的传感器节点都具有相同级别的能量，因此节点很可能在同一时间内全部死亡。
- (3) 传感器节点需要知道邻居的能量状态以便动态调整拓扑结构，带来额外开销。
- (4) 所构建的接链中，远距离的节点会引起过多的数据延迟，而且链首节点的唯一性使得链首会成为瓶颈。

8.8 无线传感器网络的定位技术



- 无线传感器网络中，位置信息对传感器网络的监测活动至关重要，没有位置信息的监测消息往往毫无意义。
- 确定事件发生的位置或获取消息的节点位置是传感器网络最基本的功能之一，对无线传感器网络应用的有效性起着关键的作用。
- 定位信息还具有下列用途：
 - ✓ 目标跟踪：实时监测行动路线，预测前进轨迹
 - ✓ 协助路由：实现定向信息查询，避免信息扩散
 - ✓ 进行网络管理：利用位置信息构建网络拓扑图

定位算法需要具备以下特点



- (1) 自组织性：传感器网络的节点随机分布，不能依靠全局的基础设施协助定位。
- (2) 健壮性：传感器节点的硬件配置低、能量少、可靠性差，测量距离时会产生误差，算法必须具有较好的容错性。
- (3) 能量高效：尽可能地减少算法中计算的复杂性，减少节点间的通信开销，以尽量延长网络的生存周期。通信开销是传感器网络的主要能量开销。
- (4) 分布式计算：每个节点计算自身位置，不能将所有信息传送到某个节点进行集中计算。

全球定位系统及机器人定位技术均不适用

定位算法分类



- 根据定位过程中是否实际测量节点间的距离或角度，定位分类为基于距离的定位和距离无关的定位。
- 基于距离的定位分为基于TOA的定位、基于TDOA的定位、基于AOA的定位、基于RSSI的定位等。
- 距离无关的定位机制主要有质心算法、DV Hop算法、Amorphous算法、APIT算法等。
- 距离无关的定位机制对硬件要求低、受环境影响小，定位误差大，但能满足多数应用要求。

DV-HOP算法



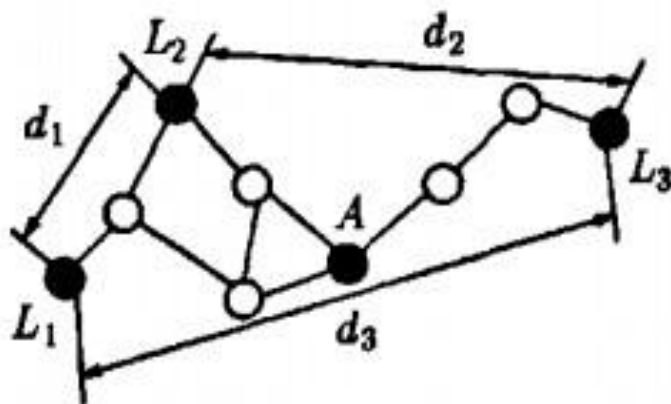
DV-HOP定位算法具有方法简单，定位精度较高的特点，它是利用距离矢量路由和GPS定位的思想提出的一系列分布式定位方法之一。

依赖节点间的信息交换和协调，由节点自行计算。

DV-HOP算法的3个阶段



- 第1阶段：网络中的各**信标节点**通过典型的距离矢量交换协议向邻居节点广播自身位置信息分组，使得网络中的所有节点**获得距信标节点的最小跳数信息**。



左图是一个由9个节点组成的小型传感器网络。 L_1 L_2 L_3 为三个信标节点，剩余的都为位置未知节点，需要对节点A定位。

DV-HOP算法的3个阶段-无偏估计准则

- 第2阶段：每个信标节点利用其它信标节点的位置信息和相隔最小跳数来计算平均每跳距离，并将其作为一个校正值广播至网络。当接收到校正值后，节点根据跳数计算与信标节点之间的距离。

平均每跳距离

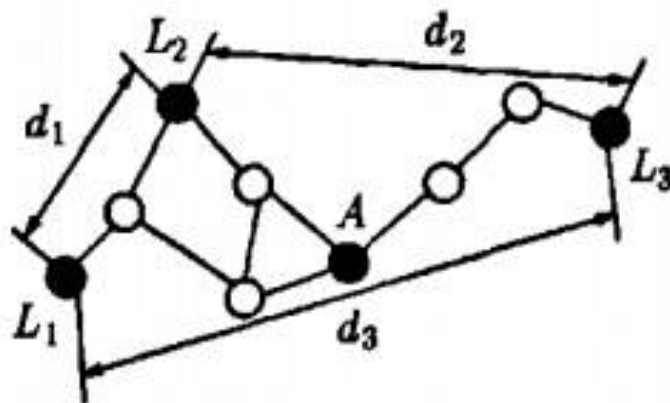


- 当获得每个信标节点的平均每跳距离后，需要将其广播至网络中的其他节点。
- 未知节点接收到的平均每跳距离有两种方法：**方法1中未知节点仅记录接收到的第1个平均每跳距离，并转发给邻居节点；方法2中未知节点记录其到每个信标节点的不同平均每跳距离。**
- 方法1确保了绝大多数节点从最近的参考节点接收平均每跳距离值，也就是说，在方法1中将从最近参考节点接收的平均每跳距离作为整个网络的平均每跳距离。但由于网络中节点分布的随机性，需要尽可能多地利用网络中的信息，采用方法2将具有比采用方法1更优越的性能。

DV-HOP算法的3个阶段



- 第3阶段：当未知节点获得与3个或更多参考节点的距离时，根据三边测量法或极大似然估计法来计算未知节点的位置。





(1) 定位精度

一般用误差值与节点无线通信半径的比值来表示传感器节点的定位精度。

- 定义平均定位误差 e_{error} 为所有未知节点的估计值与实际值的差值的平均值：
- 定义归一化平均定位误差为平均定位误差 e_{error} 与通信半径 R 的比值



(2) 节点密度

一般来说，网络中节点密度越大，定位精度越高。
DV-Hop算法只能在节点分布比较密集的无线传感器网络中才能合理地估算平均每跳距离，然后才能较准确地估算出节点的位置。

(3) 锚节点密度

因为人工部署锚节点的方式受到网络所处自然环境的限制；而搭载GPS模块的锚节点成本会比普通节点高两个数量级。这些都限制了锚节点在整个网络中所占的比例不能太大。



(4) 定位能耗

在可以容忍的定位精度范围内，尽可能的减少电源能量损耗，需要减少电源能量在通信、计算和存储方面的消耗。

(5) 覆盖率

我们将无线传感器网络中可实现定位的未知节点与网络一开始投放的总的未知节点数的比值定义为定位算法的覆盖率。我们研究自定位算法和系统的目的是最大程度地实现未知节点的精确定位。

8.9 无线传感器网络的时间同步机制

- 时间同步是需要协同工作的无线传感器网络系统的一个关键机制。
- NTP协议是Internet上广泛使用的网络时间协议，但只适用于结构相对稳定、链路很少失败的有线网络系统
- GPS系统能够以纳秒级精度与世界标准时间UTC保持同步，但需要配置固定的高成本接收机，同时在室内、森林或水下等有掩体的环境中无法使用GPS系统。
- NTP、GPS都不适合应用在无线传感器网络中。

三个基本的同步机制



- RBS机制是基于接收者-接收者的时钟同步：一个节点广播时钟参考分组，广播域内的两个节点分别采用本地时钟记录参考分组的到达时间，通过交换记录时间来实现它们之间的时钟同步。
- TINY/MINI-SYNC是简单的轻量级的同步机制：假设节点的时钟漂移遵循线性变化，那么两个节点之间的时间偏移也是线性的，可通过交换时标分组来估计两个节点间的最优匹配偏移量。
- TPSN采用层次结构实现整个网络节点的时间同步：所有节点按照层次结构进行逻辑分级，通过基于发送者-接收者的节点对方式，每个节点能够与上一级的某个节点进行同步，从而实现所有节点都与根节点的时间同步。

8.10 无线传感器网络的安全技术



- 无线传感器网络的特点决定了它的安全与传统网络安全在研究方法和计算手段上有很大的不同。
- 首先，无线传感器网络的单元节点的各方面能力都不能与目前Internet的任何一种网络终端相比，所以必然存在算法计算强度和安全强度之间的权衡问题，
- 其次，有限的计算资源和能量资源往往需要系统的各种技术综合考虑，以减少系统代码的数量。



8.11 无线传感器网络的数据管理



- 从数据存储的角度来看，无线传感器网络可被视为一种分布式数据库。
- 只关心数据查询的逻辑结构。
- 无线传感器网络的数据管理与传统的分布式数据库有很大的差别，需要考虑能量消耗及数据流特点。
- 无线传感器网络的数据管理系统的结构主要有集中式、半分布式、分布式以及层次式结构，目前大多数研究工作均集中在半分布式结构方面。
- 代表系统：TinyDB、Cougar
- 数据为中心的存储方式，一维或多维的索引方式，SQL查询语言。

8.12 无线传感器网络的数据融合

- 无线传感器网络存在能量约束。利用节点的本地计算和存储能力处理数据的融合，去除冗余信息，可以达到节省能量的目的。
- 数据融合技术可以对多份数据进行综合，提高信息准确度。
- 数据融合技术在节省能量、提高信息准确度的同时，要以牺牲网络延迟及鲁棒性为代价。
- 数据融合技术可以与无线传感器网络的多个协议层次进行结合。

应用层利用分布式数据库技术对数据进行筛选；
网络层结合数据融合机制减少数据传输量；
MAC层减少发送冲突和帧头开销。



The end