



## 第八讲 无线传感器网络



2021年6月24日13:30-15:30 逸夫楼701课程  
集中考试。

- ☐ A 准时参加
- ☐ B 我是留学生，未返校，可以网上考试

提交

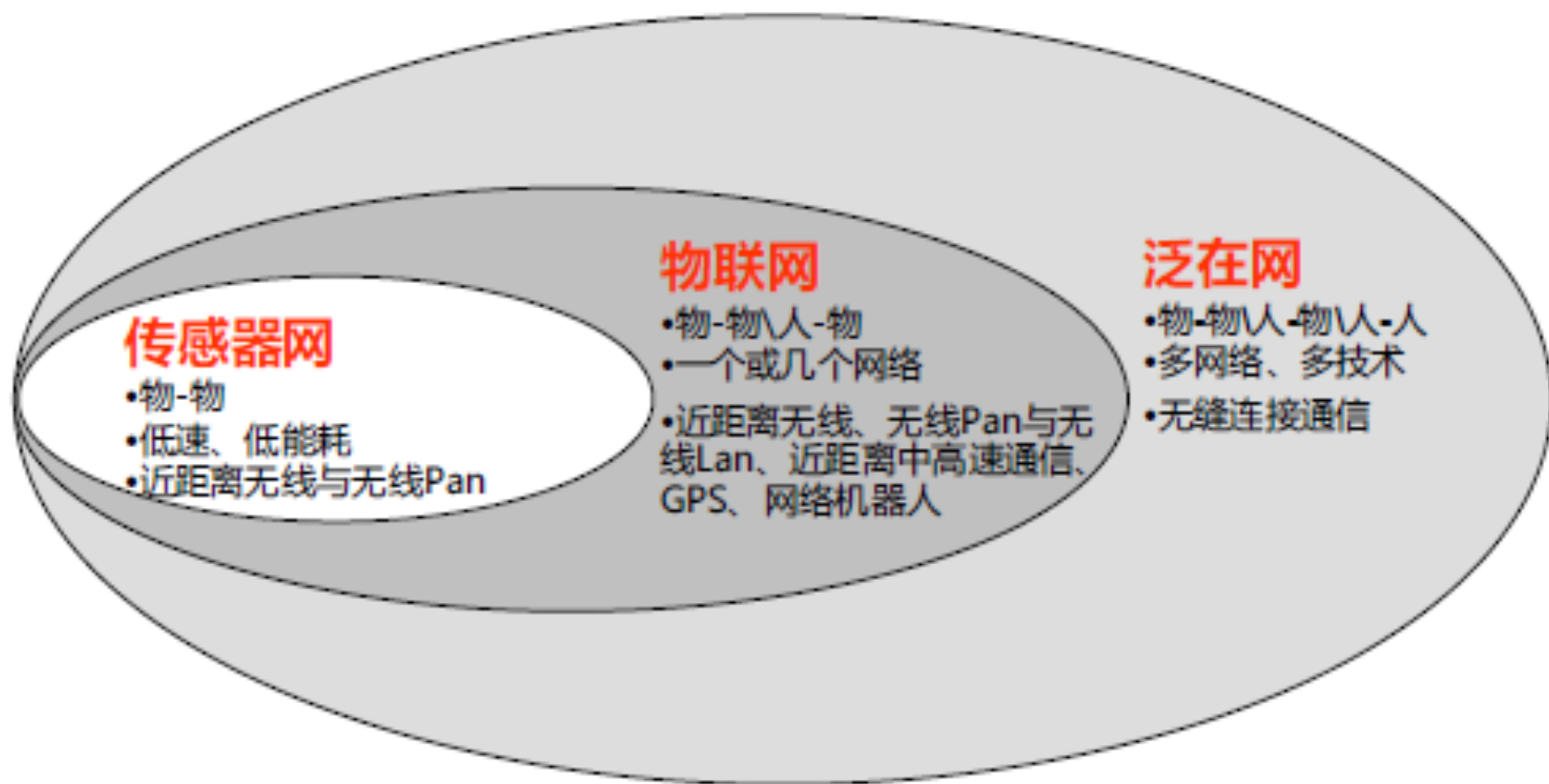


## 知识点与学习目标

- 无线传感器网络概述
- 无线传感器网络的技术体系
- 无线传感器网络的通信协议
- 无线传感器网络的技术标准
- 多传感器网络的信息融合



# 无线传感器网络技术



# 8.1 无线传感器网络概述



8.1.1 无线传感器网络介绍

8.1.2 传感器网络体系结构

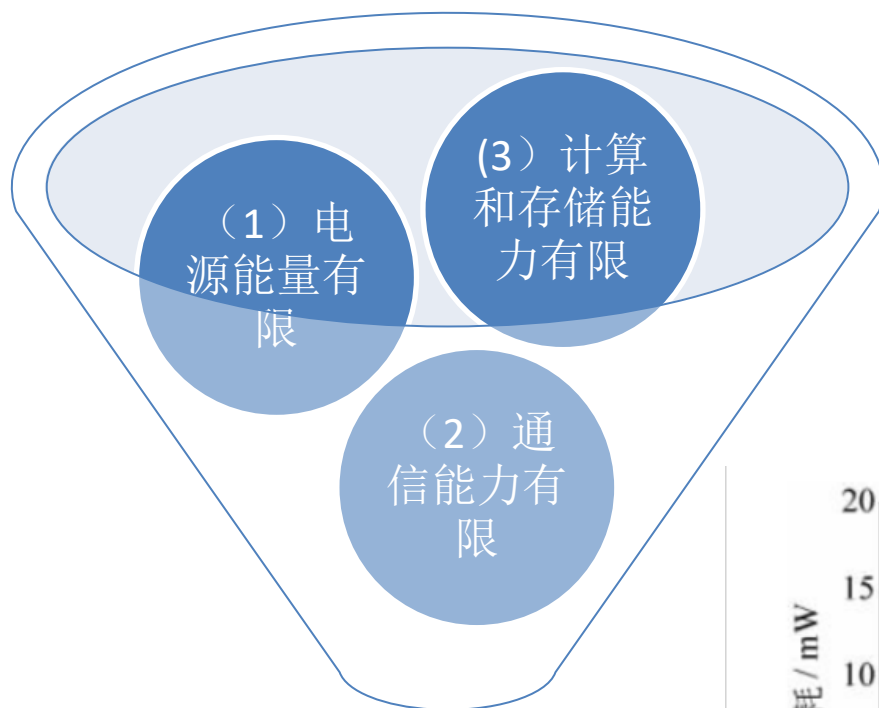
8.1.3 传感器网络的发展

## 8.1.1 无线传感器网络介绍

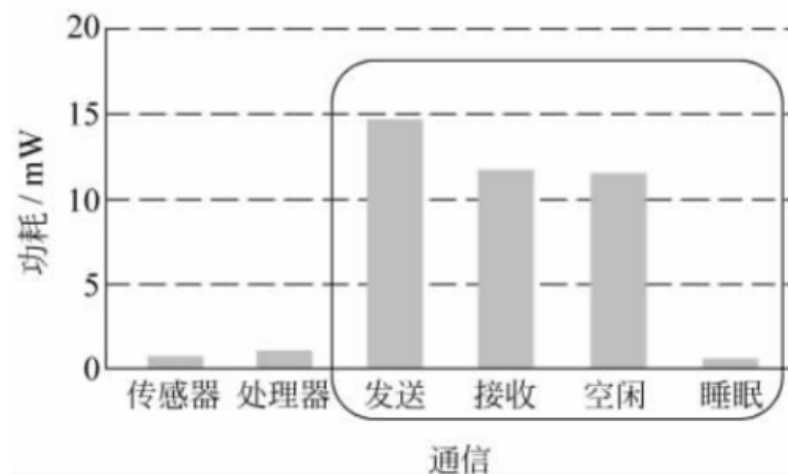


- 无线传感器网络（Wireless Sensor Network, WSN）是由部署在监测区域内大量的微型传感器节点通过无线电通信形成的一个多跳的自组织网络系统，其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域内被监测对象的信息，并发送给观察者。
- 无线传感器网络具有以下的特点：
  - （1）大规模网络 （2）自组织网络
  - （3）多跳路由 （4）动态性网络
  - （5）可靠的网络 （6）以数据为中心的网络
  - （7）应用相关的网络

## 8.1.1 无线传感器网络介绍



现实约束



## 8.1.1 无线传感器网络介绍



传感器网络的应用前景非常广阔，随着传感器网络的深入研究和广泛应用，传感器网络将逐渐深入到人类生活的各个领域。

(1) 军事应用

(2) 环境观测和预报系统

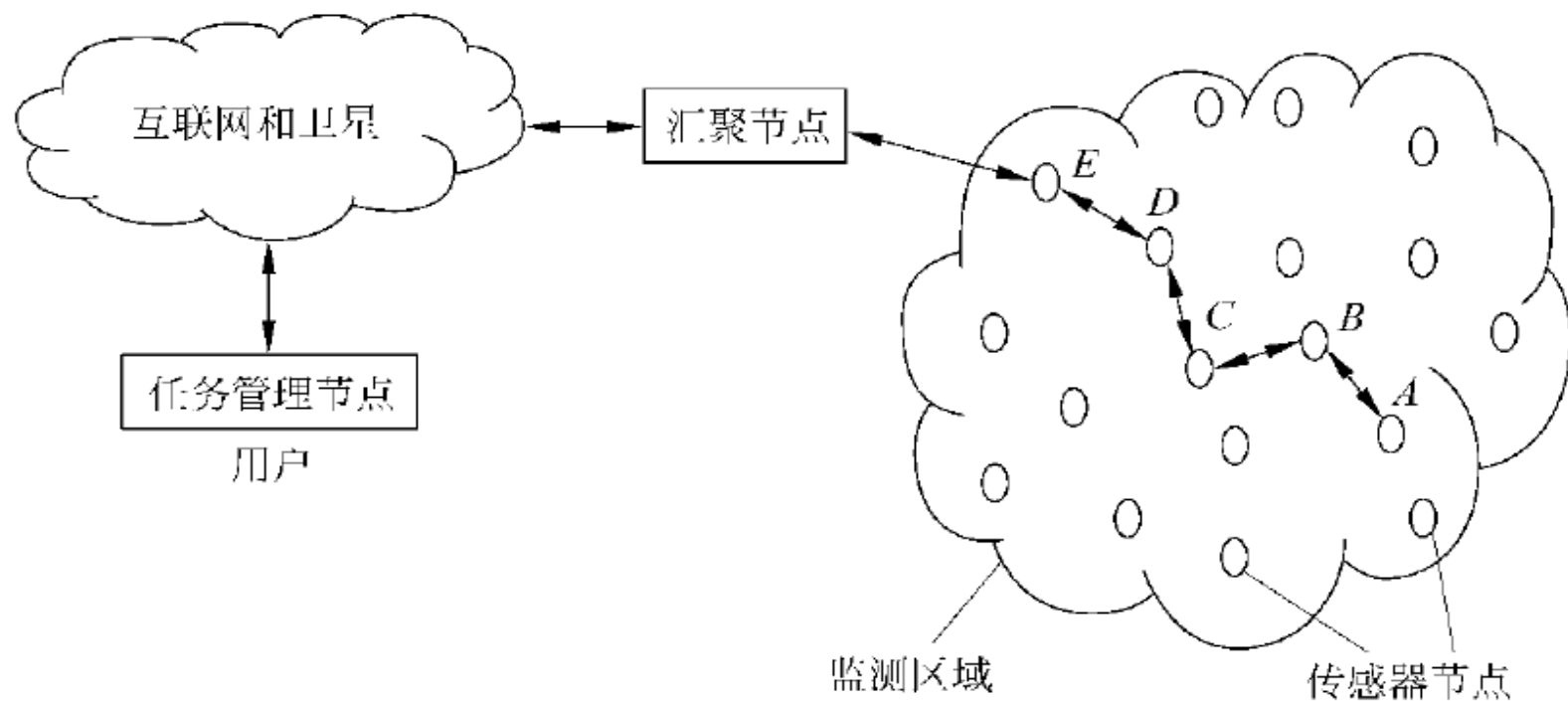
(3) 医疗护理

(4) 智能家居

(5) 建筑物状态监控



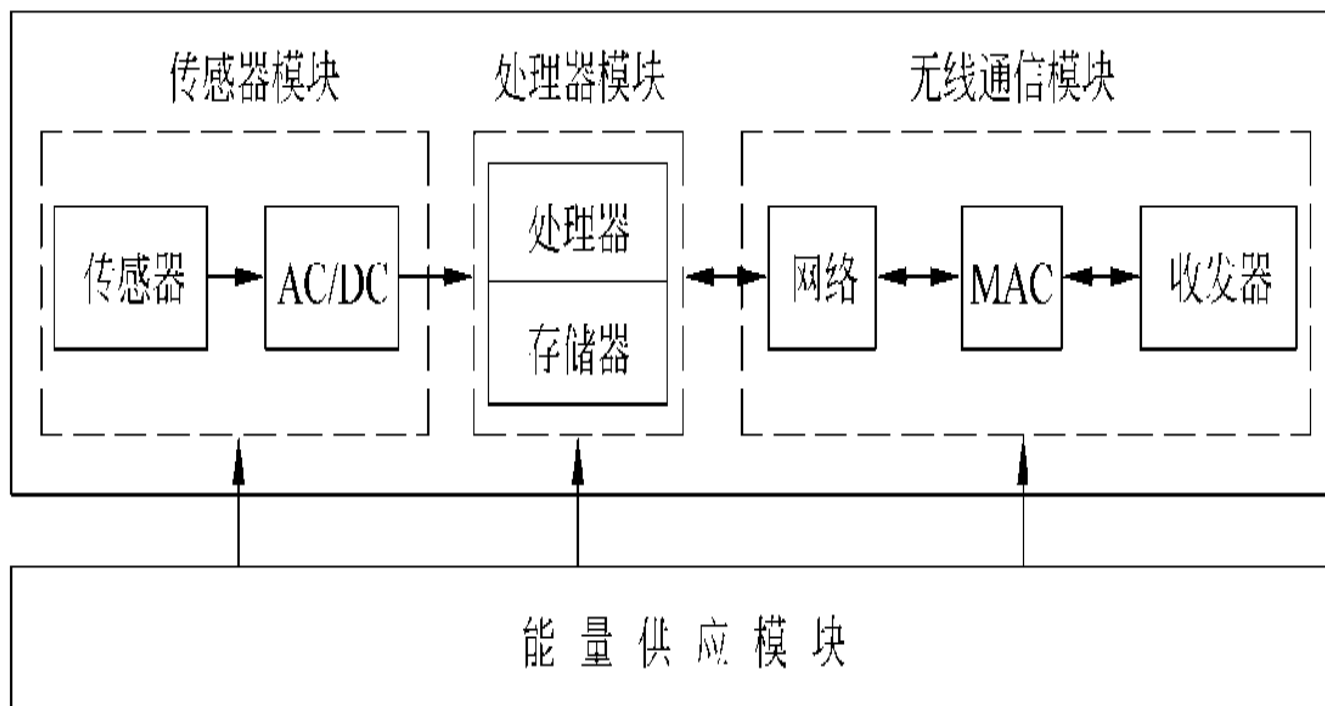
## 8.1.2 传感器网络体系结构



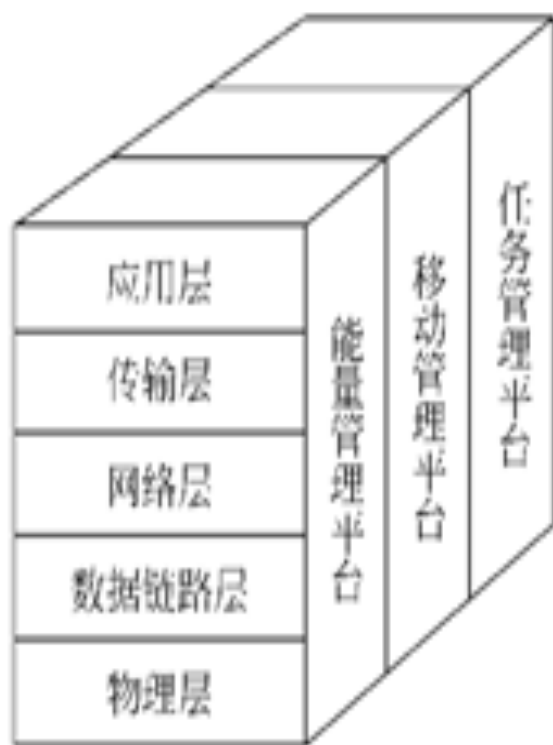
## 8.1.2 传感器网络体系结构



- 传感器节点由传感器模块、处理器模块、无线通信模块和能量供应模块四部分组成。



## 8.1.2 传感器网络体系结构



(a)

- 物理层提供简单但健壮的信号调制和无线收发技术；
- 数据链路层负责数据成帧、帧检测、媒体访问和差错控制；
- 网络层主要负责路由生成与路由选择；
- 传输层负责数据流的传输控制，是保证通信服务质量的重要部分；
- 应用层包括一系列基于监测任务的应用层软件；
- 能量管理平台管理传感器节点如何使用能源，在各个协议层都需要考虑节省能量；
- 移动管理平台检测并注册传感器节点的移动，维护到汇聚节点的路由，使得传感器节点能够动态跟踪其邻居的位置；
- 任务管理平台在一个给定的区域内平衡和调度监测任务。

## 8.1.3 传感器网络的发展



无线传感器网络的基本思想起源于20世纪70年代。

1978年，DARPA在卡耐基-梅隆大学成立了分布式传感器网络工作组。

1980年DARPA的分布式传感器网络项目（WSN）开启了传感器网络的研究先河。

20世纪80年代至90年代，研究主要在军事领域，成为网络中心战的关键技术，拉开了无线传感器网络研究的序幕。

20世纪90年代中后期，WSN引起了学术界、军界和工业界的广泛关注，开启了现代意义的无线传感器网络技术。



## 8.1.3 传感器网络的发展



WSN的地位可从以下三方面分析：

- （1）第四代传感器网络
- （2）新一代计算设备
- （3）普适计算的一个重要途径

## 8.2 无线传感器网络的技术体系



8.2.1 自组网技术

8.2.2 节点定位技术

8.2.3 时间同步技术

8.2.4 安全技术

## 8.2.1 自组网技术



- 移动自组织(Ad-Hoc)网络是一种多跳的临时性自治系统，它的原型是美国早在1968年建立的ALOHA网络和之后于1973提出的PR(Packet Radio)网络。IEEE在开发802.11标准时，提出将PR网络改名为Ad-Hoc网络，也即今天我们常说的移动自组织网络。
- 作为一种分布式网络，移动自组织网络是一种自治、多跳网络，整个网络没有固定的基础设施，能够在不能利用或者不便利用现有网络基础设施(如基站、AP)的情况下，提供终端之间的相互通信。由于终端的发射功率和无线覆盖范围有限，因此距离较远的两个终端如果要进行通信就必须借助于其它节点进行分组转发，这样节点之间构成了一种无线多跳网络。

## 2.1 自组网技术



与其他传统通信网络相比，自组织网络具有以下显著特点：

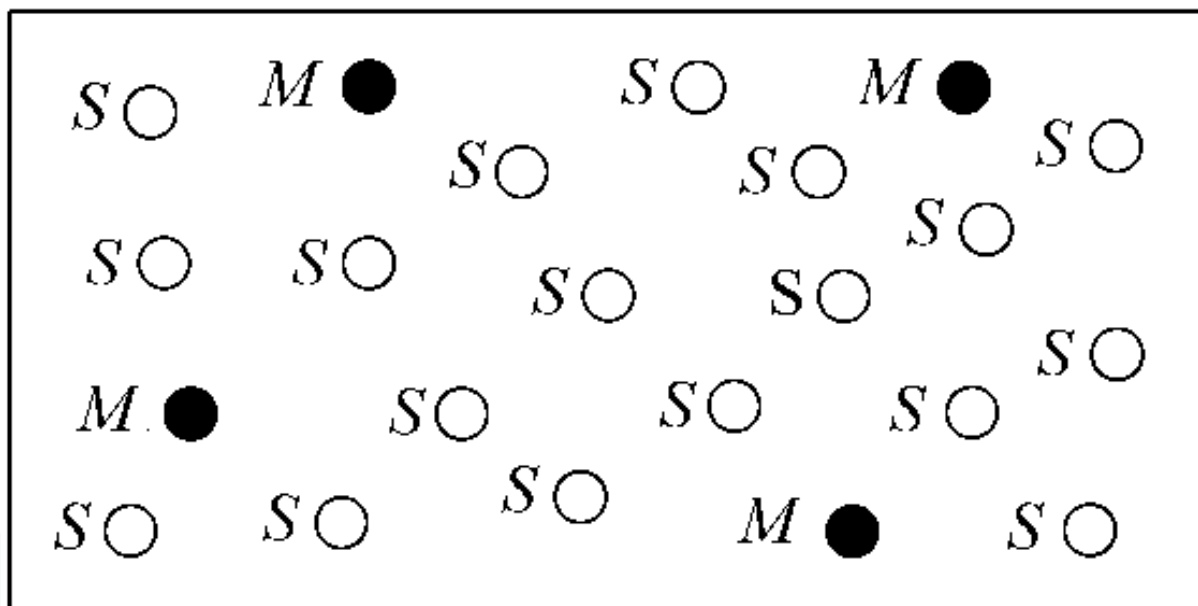
- (1)无中心和自组织性。
- (2)动态变化的网络拓扑。
- (3)受限的无线传输带宽。
- (4)安全性较差。
- (5)多跳路由。



## 8.2.2节点定位技术



- 在传感器网络节点定位技术中，根据节点是否已知自身的位置，把传感器节点分为信标节点和未知节点。



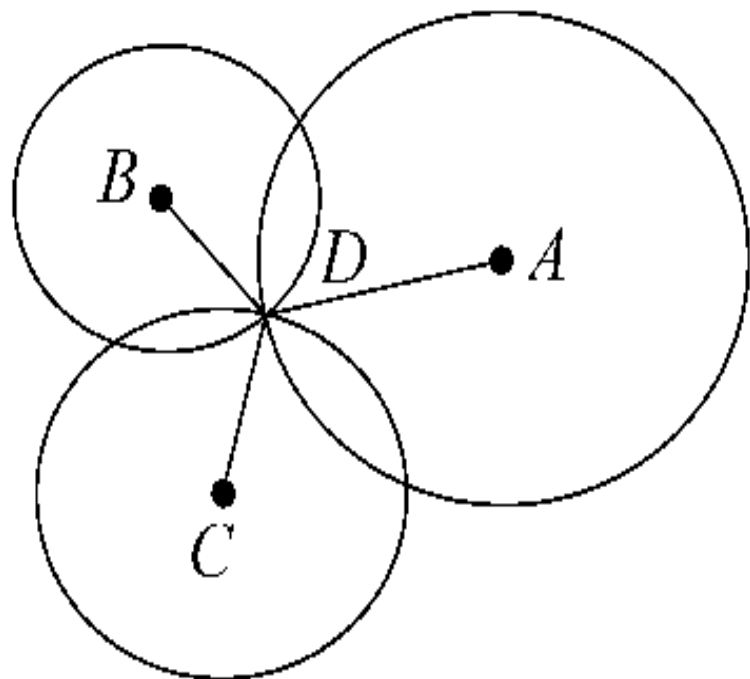
## 8.2.2节点定位技术



- 邻居节点 (neighbor node)
- 跳数 (hop count)
- 跳段距离 (hop distance)
- 基础设施 (infrastructure)
- 到达时间 (Time Of Arrival, TOA)
- 到达时间差 (Time Difference Of Arrival, TDOA)
- 接收信号强度指示 (Received Signal Strength Indicator, RSSI)
- 到达角度 (Angle Of Arrival, AOA)
- 视线关系 (Line of Sight, LOS)
- 非视线关系 (No LOS, NLOS)

## 8.2.2节点定位技术

### 1) 三边测量法



已知A、B、C三个节点的坐标以及它们到未知节点D的距离，假设节点D的坐标为 $(x, y)$ ，那么，存在下列公式：

$$\begin{cases} \sqrt{(x-x_a)^2 + (y-y_a)^2} = d_a \\ \sqrt{(x-x_b)^2 + (y-y_b)^2} = d_b \\ \sqrt{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2} = d_c \end{cases}$$

可以得到节点D的坐标为：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(x_a - x_c) & 2(y_a - y_c) \\ 2(x_b - x_c) & 2(y_b - y_c) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_a^2 - x_c^2 + y_a^2 - y_c^2 + d_c^2 - d_a^2 \\ x_a^2 - x_c^2 + y_b^2 - y_c^2 + d_c^2 - d_b^2 \end{bmatrix}$$

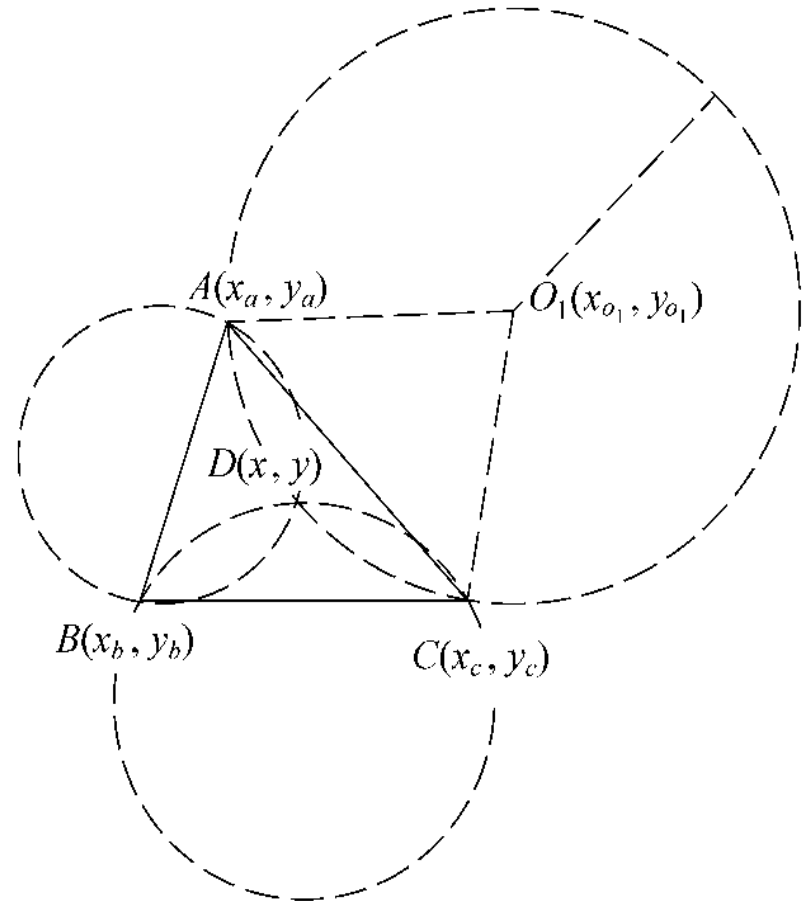
## 8.2.2节点定位技术

### 2) 三角测量法



- 已知A, B, C三个节点的坐标, 节点D相对于节点A, B, C的角度分别为:  $\angle ADB$ ,  $\angle ADC$ ,  $\angle BDC$ , 假设节点D的坐标为  $(x, y)$ 。
- 对于节点A, C和角 $\angle ADC$ , 如果弧段AC在 $\triangle ABC$ 内, 那么能够惟一确定一个圆, 设圆为 $O_1(x_{o1}, y_{o1})$ , 半径为 $r_1$ , 那么

$$\alpha = \angle AO_1C = 2\pi - 2\angle ADC$$



## 8.2.2 节点定位技术

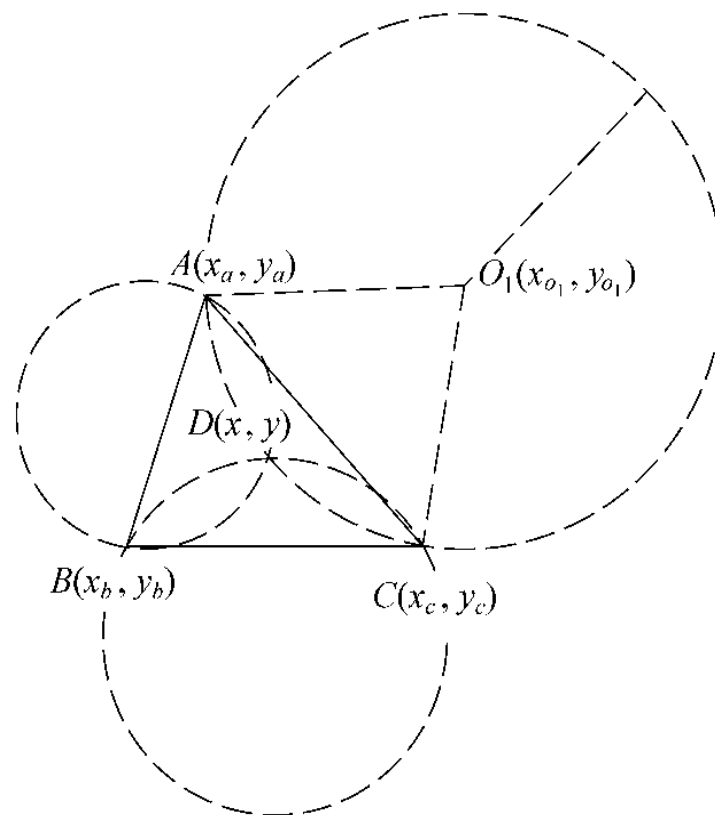
### 2) 三角测量法



- 并存在下列公式：

$$\begin{cases} \sqrt{(x_{O1} - x_a)^2 + (y_{O1} - y_a)^2} = r_1 \\ \sqrt{(x_{O1} - x_b)^2 + (y_{O1} - y_b)^2} = r_1 \\ (x_a - x_c)^2 + (y_a - y_c)^2 = 2r_1^2 - 2r_1^2 \cos \alpha \end{cases}$$

- 由式能够确定圆心 点的坐标和半径 。同理对A， B，  $\angle ADB$ 和B， C，  $\angle BDC$ 分别确定相应的圆心、半径、圆心和半径。
- 最后利用三边测量法，确定D点坐标。

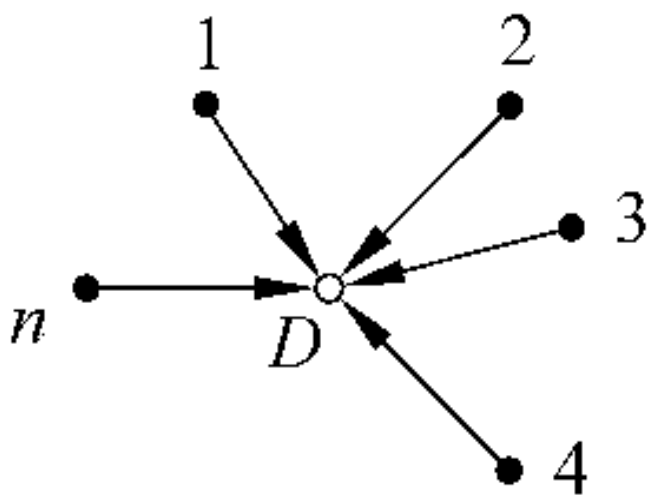


## 8.2.2 节点定位技术

### 3) 极大似然估计法



- 极大似然估计法如图，已知1，2，3等n个节点的坐标和它们到节点D的距离，假设节点D的坐标为  $(x, y)$ 。



- 那么，存在下列公式：

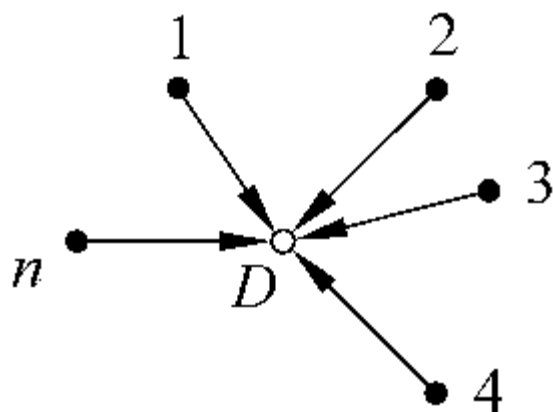
$$\begin{cases} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 = d_1^2 \\ \vdots \\ (x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 = d_n^2 \end{cases}$$

- 从第一个方程开始分别减去最后一个方程，得：

$$\begin{cases} x_1^2 - x_n^2 - 2(x_1 - x_n)x + y_1^2 - y_n^2 - 2(y_1 - y_n)y = d_1^2 - d_n^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 - 2(x_{n-1} - x_n)x + y_{n-1}^2 - y_n^2 - 2(y_{n-1} - y_n)y = d_{n-1}^2 - d_n^2 \end{cases}$$

## 8.2.2 节点定位技术

### 3) 极大似然估计法



线性方程表示方式为： $AX=b$ ，其中：

$$A = \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_n) & 2(y_1 - y_n) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_{n-1} - x_n) & 2(y_{n-1} - y_n) \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} x_1^2 - x_n^2 + y_1^2 - y_n^2 + d_n^2 - d_1^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 + y_{n-1}^2 - y_n^2 + d_n^2 - d_{n-1}^2 \end{bmatrix}$$

使用标准的最小均方差估计方法可以得到节点D的坐标为：

$$\hat{X} = (A^T A)^{-1} A^T b$$

## 8.2.2节点定位技术



在传感器网络中，定位算法通常有以下几种分类：

- (1) 基于距离的定位算法和距离无关的定位算法
- (2) 递增式的定位算法和并发式的定位算法
- (3) 基于信标节点的定位算法和无信标节点的定位算法

在基于距离的定位中，测量节点间距离或方位时采用的方法有TOA，TDOA，RSSI和AOA等。

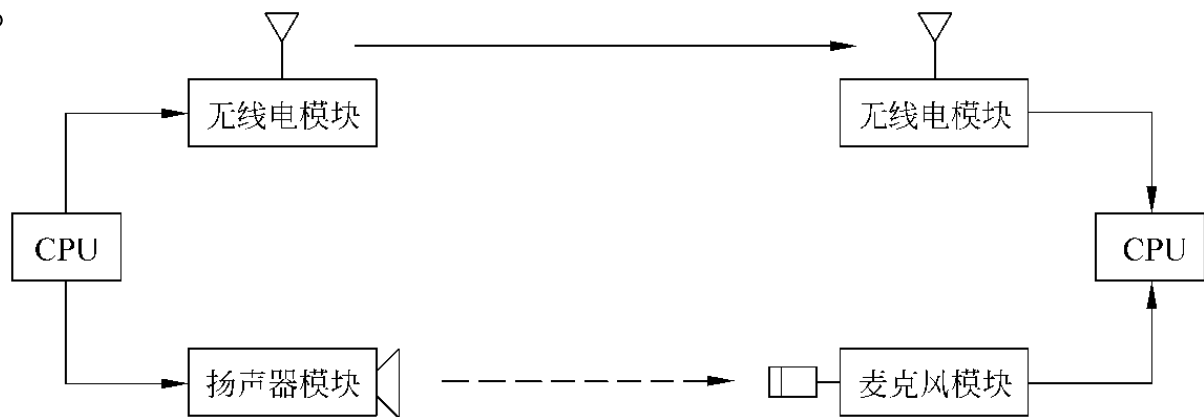


## 8.2.2节点定位技术

### 2.基于TOA的定位



设两个节点间时间同步，发送节点的扬声器模块在发送伪噪声序列信号的同时，无线电模块通过无线电同步消息通知接收节点伪噪声序列信号发送的时间，接收节点的麦克风模块在检测到伪噪声序列信号后，根据声波信号的传播时间和速度计算发送节点和接收节点之间的距离。节点在计算出距离多个邻近信标节点的距离后，可以利用三边测量算法或极大似然估计算法计算出自身位置。

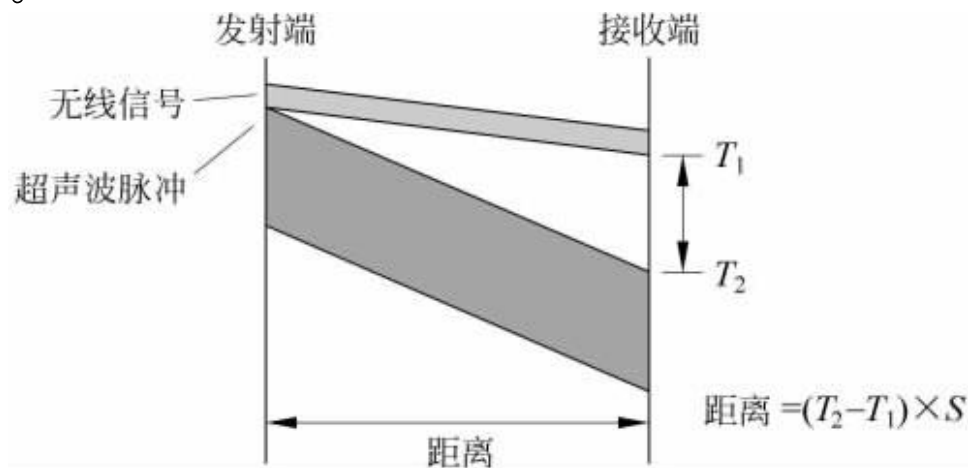


## 8.2.2节点定位技术

### 3.基于TDOA的定位



- 在基于到达时间差TDOA的定位机制中，发射节点同时发射两种不同传播速度的无线信号，接收节点根据两种信号到达的时间差以及已知这两种信号的传播速度，计算两个节点之间的距离，再通过已有基本的定位算法计算出节点的位置。
- 发射节点同时发射无线射频信号和超声波信号，接收节点记录两种信号到达的时间，已知无线射频信号和超声波的传播速度，那么两点之间的距离为  $(T_2 - T_1) \times S$ ，其中  $S = C_1 C_2 / (C_1 - C_2)$ 。

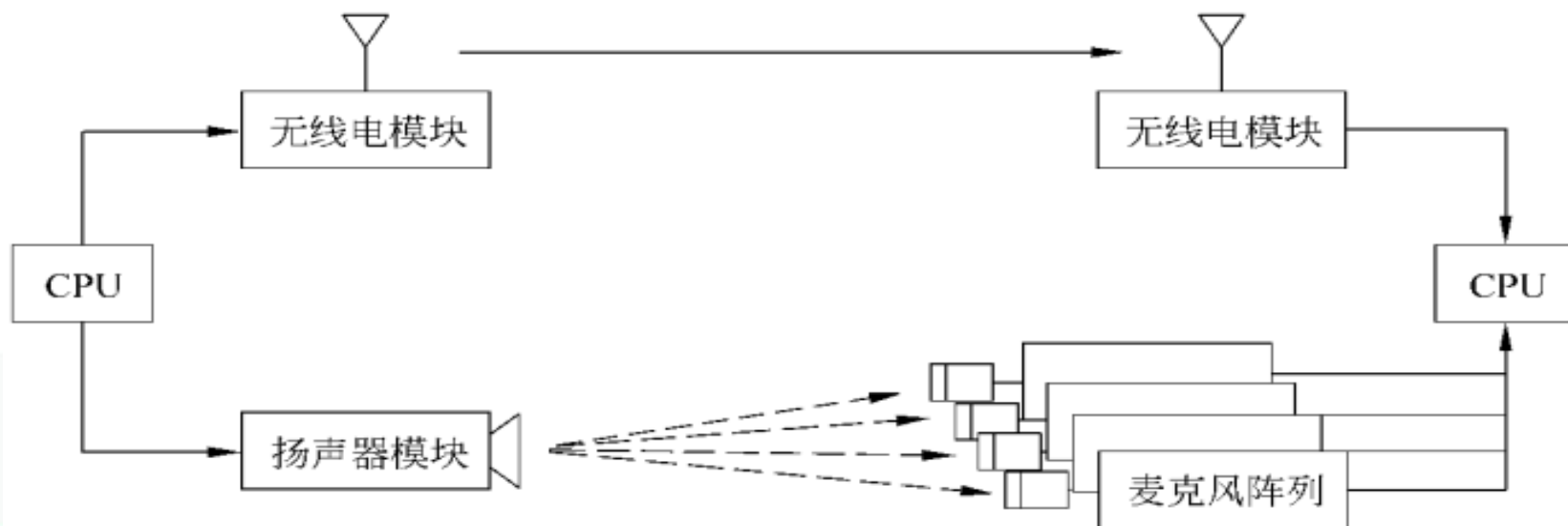


## 8.2.2 节点定位技术

### 4. 基于AOA的定位

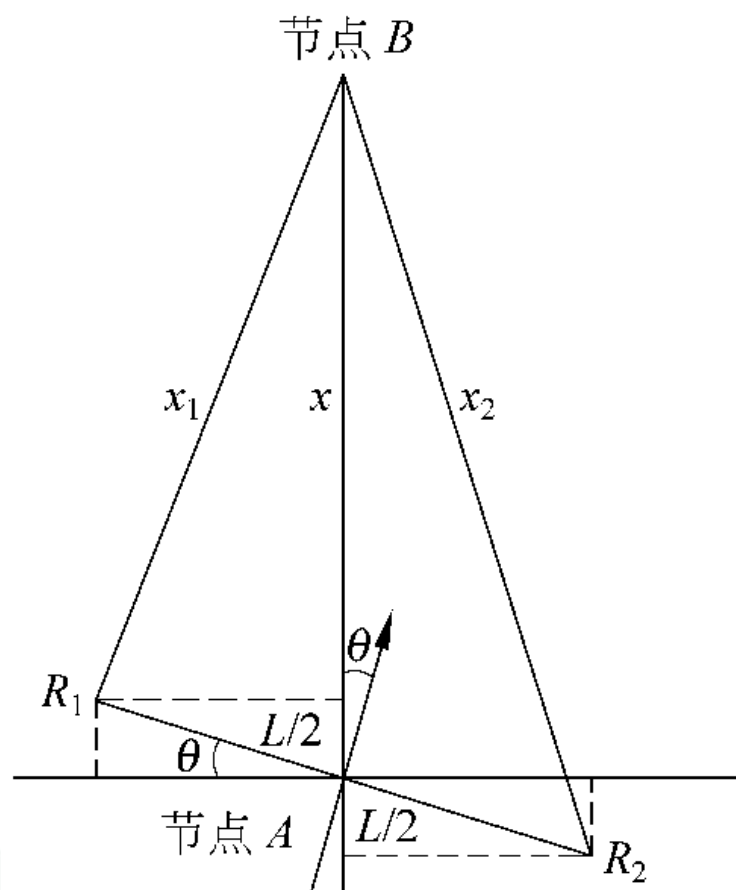


- 在基于到达角度AOA的定位机制中，接收节点通过天线阵列或多个超声波接收机感知发射节点信号的到达方向，计算接收节点和发射节点之间的相对方位或角度，再通过三角测量法计算出节点的位置。
- 接收节点通过麦克风阵列，感知发射节点信号的到达方向。下面以每个节点配有两个接收机为例，简单阐述AOA测定方位角和定位的实现过程，定位过程可分为三个阶段。

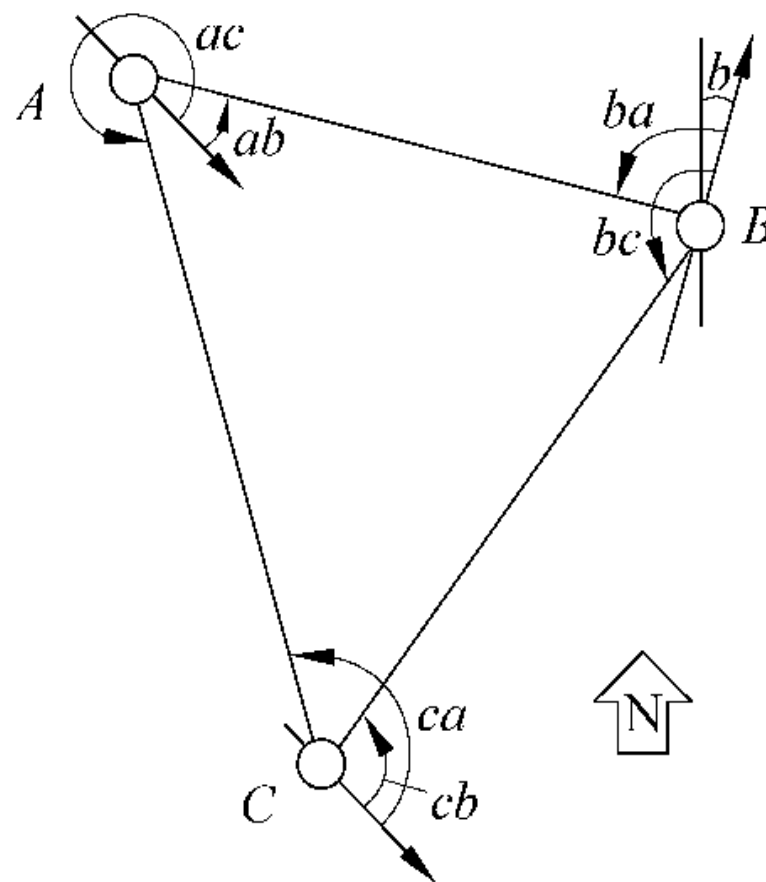


## 8.2.2 节点定位技术

### 4. 基于AOA的定位



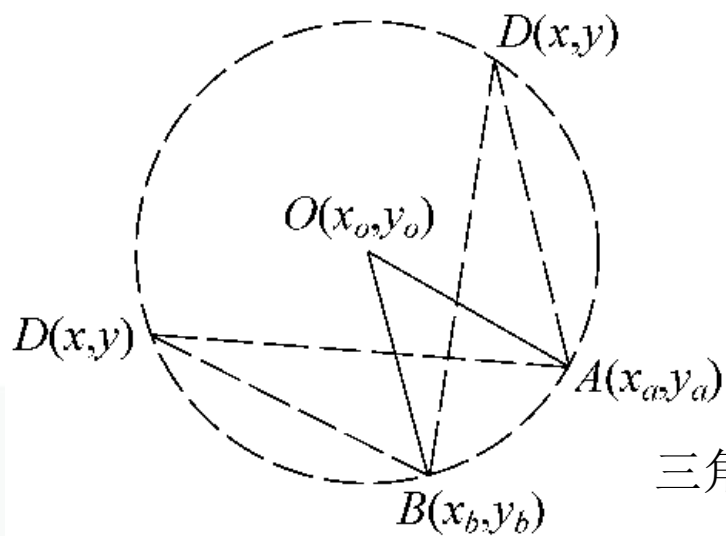
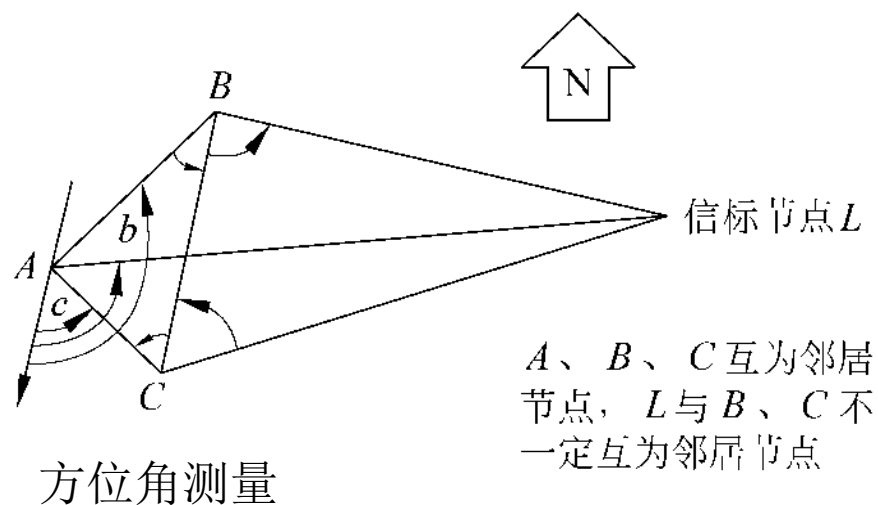
节点结构图示



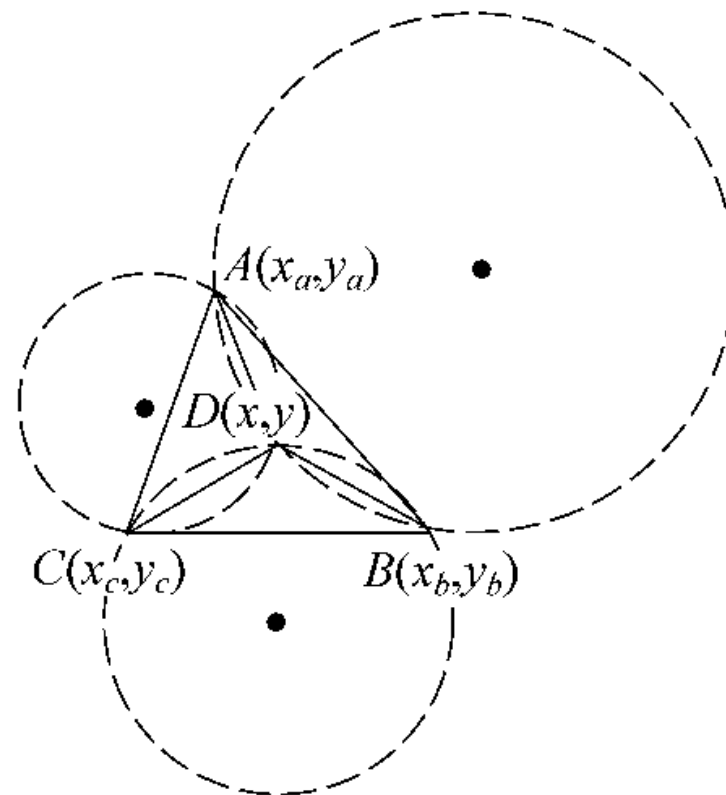
方位角图示

## 8.2.2节点定位技术

### 4. 基于AOA的定位



三角测量法图示



三角测量法转化为三边测量法

## 8.2.2节点定位技术

### 5.基于RSSI的定位



- 在基于接收信号强度指示RSSI的定位中，已知发射节点的发射信号强度，接收节点根据收到信号的强度，计算出信号的传播损耗，利用理论和经验模型将传输损耗转化为距离，再利用已有的算法计算出节点的位置。

$$P(d)[dBm] = P(d_0)[dBm] - 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) - \begin{cases} nW \times WAF, & nW < C \\ C \times WAF, & nW \geq C \end{cases}$$

- 虽然在实验环境中RSSI表现出良好的特性，但是在现实环境中，温度、障碍物、传播模式等条件往往都是变化的，使得该技术在实际应用中仍然存在困难。

## 8.2.3 时间同步技术



在分布式系统中，不同的节点都有自己的本地时钟。由于不同节点的晶体振荡器频率存在偏差，以及温度变化和电磁波干扰等，即使在某个时刻所有节点都达到时间同步，它们的时间也会逐渐出现偏差，而分布式系统的协同工作需要节点间的时间同步，因此时间同步机制是分布式系统基础框架的一个关键机制。

传感器网络的时间同步机制的主要性能参数如下：

- (1) 最大误差
- (2) 同步期限
- (3) 同步范围
- (4) 可用性
- (5) 效率
- (6) 代价和体积



## 8.2.3 时间同步技术

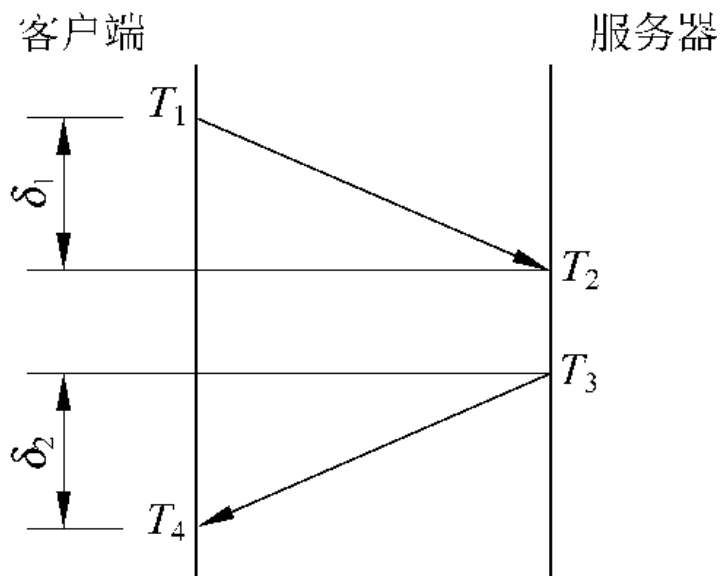


### 1. 网络时间协议NTP

- 在传统网络中提出了多种网络时间同步机制，C/S模式是其中一种常用的时间同步模式。时间服务器周期性地向客户端发送时间同步消息，同步消息中包含服务器的当前时间。如果服务器到客户端的典型延迟相对期望精度小，只需要一个时间同步消息就能实现客户端与服务器之间的时间同步。通常的扩展是客户端产生时间同步请求消息，服务器回应时间同步应答消息，通过测量这两个分组总的往返时间来估计单程的延迟，从而计算从服务器给分组打上时标到客户端接收到分组打上时标之间的时间间隔，获得相对精确的时间同步。



## 8.2.3 时间同步技术



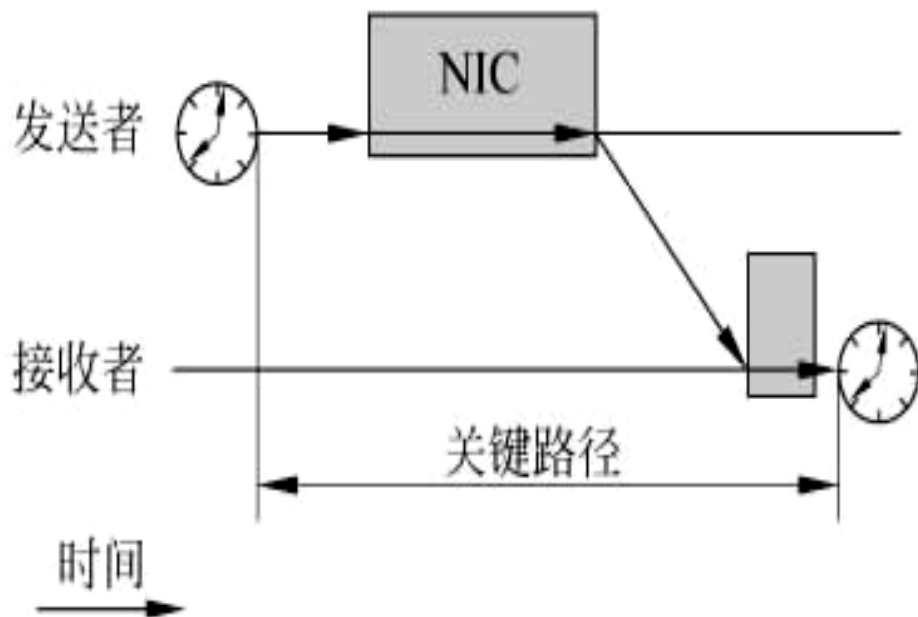
假设客户端时钟比服务器时钟快 $\theta$ ，下列关系式成立。

$$\begin{cases} T_2 = T_1 + \theta + \delta_1 \\ T_4 = T_3 - \theta + \delta_2 \\ \delta = \delta_1 + \delta_2 \end{cases}$$

假设时间请求消息和时间应答消息在网上传播的时间相同，即 $\delta_1 = \delta_2$ ，则可解得：

$$\begin{cases} \theta = \frac{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)}{2} \\ \delta = (T_2 - T_1) + (T_4 - T_3) \end{cases}$$

## 8.2.3 时间同步技术



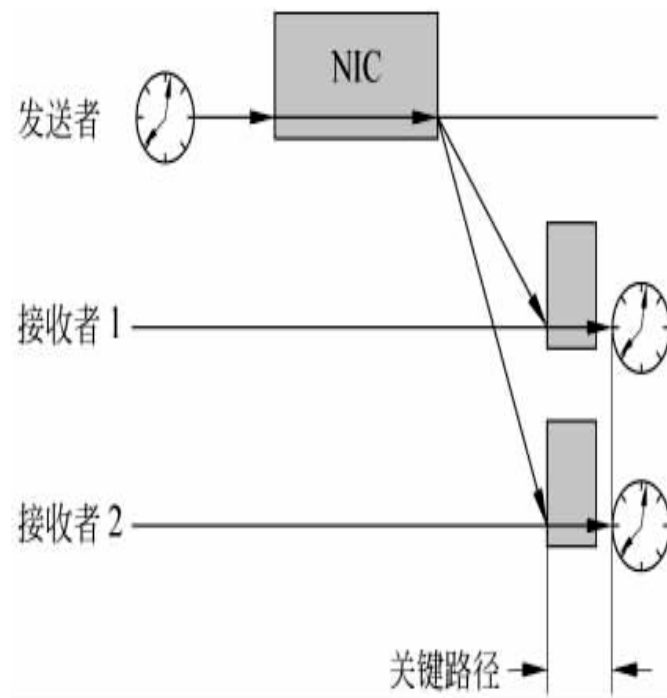
- 为了详细分析时间同步误差，在从发送节点到接收节点之间的关键路径上，把消息传输延迟细分为四个部分。
- 第一，发送时间；
- 第二，访问时间；
- 第三，传播延迟；
- 第四，接收时间。

## 8.2.3 时间同步技术



### 2.RBS机制的基本原理

- 通过接收节点对时抵消发送时间和访问时间。  
发送节点广播一个信标分组，广播域中两个节点都能够接收到这个分组。每个接收节点分别根据自己的本地时间记录接收到信标分组的时刻，然后交换它们记录的信标分组接收时间。两个接收时间的差值相当于两个接收节点间的时间差值，其中一个接收节点可以根据这个时间差值更改它的本地时间，从而达到两个接收节点的时间同步。



## 8.2.4安全技术



- 传感器网络的安全和一般网络安全的出发点是相同的，都要解决如下问题：
  - (1) 机密性问题。
  - (2) 点到点的消息认证问题。
  - (3) 完整性鉴别问题。
  - (4) 新鲜性问题。
  - (5) 认证组播/广播问题。
  - (6) 安全管理问题。

## 8.2.4安全技术



传感器网络安全问题的解决思路和方法与传统网络安全问题不同，这主要是由网络自身的特点决定的：

- (1) 有限的存储空间和计算能力
- (2) 缺乏后期节点布置的先验知识
- (3) 布置区域的物理安全无法保证
- (4) 有限的带宽和通信能量
- (5) 不仅是点到点的安全，更是整个网络的安全
- (6) 应用相关性

## 8.2.4安全技术



下面详细分析了传感器网络在网络协议栈的各个层次中可能受到的攻击方法和主要防御手段。

网络层次	攻击方法	防御手段
物理层	拥塞攻击 (jamming)	宽频 (跳频)、优先级消息、低占空比、区域映射、模式转换
	物理破坏 (tampering)	破坏证明、节点伪装和隐藏
链路层	碰撞攻击 (collision)	纠错码
	耗尽攻击 (exhaustion)	设置竞争门限
	不公平竞争 (unfairness)	使用短帧策略和非优先级策略
网络层	丢弃和贪婪破坏 (neglect and greed)	使用冗余路径、探测机制
	汇聚节点攻击 (homing)	使用加密和逐跳认证机制
	方向误导攻击 (misdirection)	出口过滤; 认证、监视机制
	黑洞攻击 (black holes)	认证、监视、冗余机制
传输层	洪泛攻击 (flooding)	客户端谜题
	失步攻击 (desynchronization)	认证

## 8.3 无线传感器网络的通信协议



8.3.1无线传感器网络的路由协议

8.3.2无线传感器网络的MAC协议

## 8.3.1 无线传感器网络的路由协议



- 路由是把信息从信息源穿过网络传递到目的地的行为。
- 路由技术:决定最优路径和传输数据包。
- 路由器是网络间的连接设备，它的重要工作之一是路径选择。
- 路由包含两个基本的动作：确定最佳路径和通过网络传输信息。
- 路由协议负责将数据分组从源节点通过网络转发到目的节点，它主要包括两个方面的功能：寻找源节点和目的节点间的优化路径，将数据分组沿着优化路径正确转发。



## 8.3.1 无线传感器网络的路由协议



### (1) 路径选择

- 为了帮助选路，路由算法初始化并维护包含路径信息的路由表，路径信息根据使用的路由算法不同而不同。路由算法根据许多信息来填充路由表。目的/下一跳地址告知路由器到达该目的地的最佳方式是把分组发送给代表“下一跳”的路由器，当路由器收到一个分组，它就检查其目标地址，尝试将此地址与其“下一跳”相联系。

### (2) 交换

- 交换算法相对而言较简单，对大多数路由协议而言是相同的，多数情况下，某主机决定向另一个主机发送数据，通过某些方法获得路由器的地址后，源主机发送指向该路由器的物理地址的数据包，其协议地址是指向目的主机的。

## 8.3.1 无线传感器网络的路由协议



- 无线传感器网络的路由协议具有以下特点：
  - （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。
- 针对传感器网络路由机制的上述特点，在根据具体应用设计路由机制时，要满足下面的传感器网络路由机制的要求：
  - （1）能量高效。
  - （2）可扩展性。
  - （3）鲁棒性。
  - （4）快速收敛性。

## 8.3.1 无线传感器网络的路由协议



- 根据不同应用对传感器网络各种特性的敏感度不同，将路由协议分为四种类型。
- 四种类型的路由协议分别是：
  - （1）能量感知路由协议。
  - （2）基于查询的路由协议。
  - （3）地理位置路由协议。
  - （4）可靠的路由协议。

## 8.3.2 无线传感器网络的MAC协议



- 在无线传感器网络中，介质访问控制（Medium Access Control, MAC）协议决定无线信道的使用方式，在传感器节点之间分配有限的无线通信资源，用来构建传感器网络系统的底层基础结构。
- 在设计无线传感器网络的MAC协议时，需要着重考虑以下几个方面：
  - （1）节省能量。
  - （2）可扩展性。
  - （3）网络效率。

## 8.3.2 无线传感器网络的MAC协议



- 目前针对不同的传感器网络应用，研究人员从不同方面提出了多个MAC协议，但对传感器网络MAC协议还缺乏一个统一的分类方式。可以按照下列条件分类MAC协议：
  - 第一，采用分布式控制还是集中控制；
  - 第二，使用单一共享信道还是多个信道；
  - 第三，采用固定分配信道方式还是随机访问信道方式。

## 8.3.2 无线传感器网络的MAC协议



按照第三种分类方法，将传感器网络的MAC协议分为三类：

- （1）采用无线信道的时分复用方式（Time Division Multiple Access, TDMA），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；
- （2）采用无线信道的随机竞争方式，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；
- （3）其他MAC协议，如通过采用频分复用或者码分复用等方式，实现节点间无冲突的无线信道的分配。

## 8.4 无线传感器网络的技术标准



8.8.1 IEEE802.15.4标准

8.8.2 ZigBee协议规范

## 8.8.1 IEEE802.15.4标准



IEEE802.15工作组内有四个任务组，分别制定适合不同应用标准。

这四个标准如下：

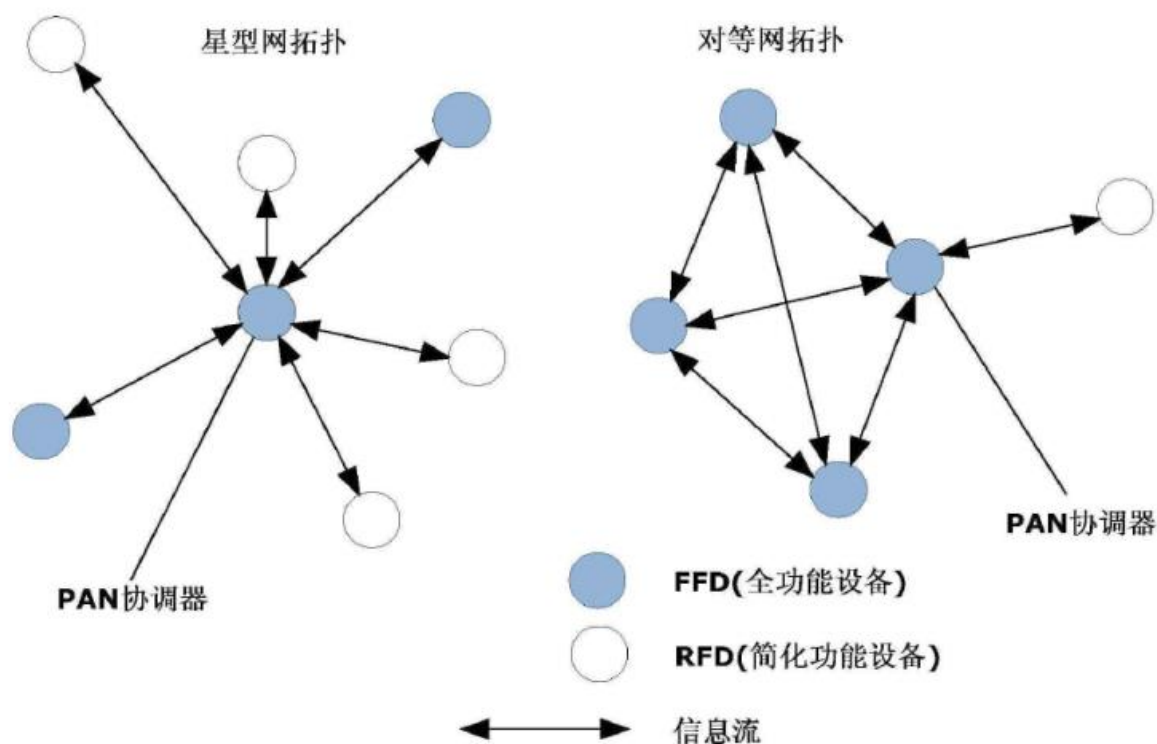
- 802.15.1本质上只是蓝牙低层协议的一个正式标准化版本。
- 802.15.2是对蓝牙和802.15.1的一些改变，其目的是减轻与802.11b和802.11g网络的干扰。
- 802.15.3也称WiMedia，旨在实现高速率。最初它瞄准的是消费类器件，如电视机和数码照相机等。
- IEEE802.15.4是一个低速率无线个人局域网标准。这种低速率无线个人局域网的网络结构简单、成本低廉、具有有限的功率和灵活的吞吐量。低速率无线个人局域网的主要目标是实现安装容易、数据传输可靠、短距离通信、极低的成本、合理的电池寿命，并且拥有一个简单而且灵活的通信网络协议。



## 8.4.1 IEEE802.15.4标准



为使供应商能提供最低可能功耗的设备，IEEE（Institute of Electrical and Electronics Engineers，电气及电子工程师学会）定义了两种不同类型的设备：一种是完整功能设备另一种是简化功能设备。



## 8.4.1 IEEE802.15.4标准



- IEEE802.15.4仅定义了物理层和MAC层的规范。根据标准的定义，物理层实现了如下功能：信道进行能量检测(Energy Detected)、对收到的包进行链路质量指示(Link Quality Indication, LQI)、接收发送数据、空闲信道评估(Clear Channel Assessment CCA)等。
- 信道能量检测为网络层提供信道选择依据。它主要测量目标信道中接收信号的功率强度，由于这个检测本身不进行解码操作，所以检测结果是有效信号功率和噪声信号功率之和。
- 链路质量指示为网络层或者应用层提供接收数据帧时无线信号的强度和质量的信  
息，与信道能量检测不同的是，它要对信号解码，生成的是一个信噪比指标。这个信噪比指标和物理层数据单元一道提交给上层处理。
- 空闲信道评估判断信道是否空闲。IEEE802.15.4定义了三种空闲信道评估模式：
  - 第一种，简单判断信道的信号能量，当信号能量低于某一个门限值就认为信道空闲；
  - 第二种：通过判断无线信号的特征，这个特征主要包括两个方面，即扩频信号和载波频率；
  - 第三种：模式是前两种模式的综合，同时检测信号强度和信号特征，给出信道空闲判断。

## 8.4.1 IEEE802.15.4标准



- IEEE802.15.4定义的LR-WPAN网络中具有两种拓扑结构：星型网拓扑和对等网拓扑。
- 在星型网拓扑结构中，通信建立在设备和一个叫做PAN协调器的中心控制设备之间。对于网络通信来说，这些设备可以作为发起设备或者终端设备；PAN协调器则可以作为发起设备、终端设备或路由设备。PAN协调器是主要的耗能设备，其他从设备均可采用电池供电。目前星型网络拓扑结构主要用在家庭自动化，个人计算机（PC）外设，玩具，游戏和个人健康检查等方面。

## 8.4.1 IEEE802.15.4标准



- 在对等网拓扑结构中，也存在一个PAN协调器。它不同于星型网络结构的是网络中的任何一个设备只要在它的通信范围内，就可以和其他设备进行通信。对等网络拓扑结构可以形成更加复杂的网络结构，如网状网。对等网主要应用于工业控制和检测，无线传感网络，物资跟踪，农业智能化以及安全等领域。

## 8.4.1 IEEE802.15.4标准



- IEEE802.15.4标准中给出了两种物理层定义：
- 低频段：
  - 868.0MHz~858.6MHz（欧洲），
  - 以及902MHz~928MHz（美洲大部分和太平洋地区）
- 高频段：
  - 2.400GHz~2.485GHz（全世界范围）

$$F_c = 868.3 \text{ MHz}, k=0$$

$$F_c = 906 + 2(k-1) \text{ MHz}, k=1, 2, \dots, 9, 10$$

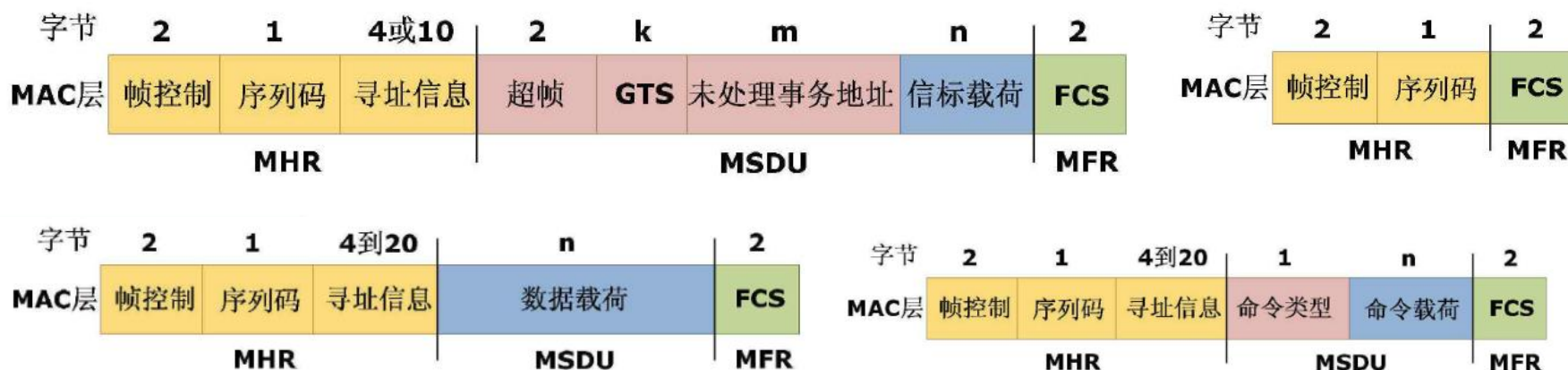
$$F_c = 2405 + 5(k-11) \text{ MHz}, k=11, 12, \dots, 25, 26$$

## 8.4.1 IEEE802.15.4标准



IEEE802.15.4的介质访问控制层（MAC）帧被称为MAC协议数据单元（MPDU），其长度不超过127B。它具有四种不同的帧形式，即信标帧、数据帧、确认帧和命令帧。

- 1) 信标帧供协调者使用。
- 2) 数据帧承载所有的数据。
- 3) 确认帧确认帧的顺利传送。
- 4) 命令帧用来处理MAC对等实体之间的控制传送。



## 8.4.1 IEEE802.15.4标准



- 根据标准的定义，MAC层的完成如下六个方面的功能：
- 协调器产生并发送信标帧，普通设备根据协调器的信标帧与协调器同步；
- 支持PAN网络关联(Association)和取消关联(Disassociation)操作；
- 支持无线信道通信安全；
- 使用CSMA-CA机制共享物理信道；
- 支持时隙保障(Guaranteed Time Slot, GTS)与机制；
- 为两个对等的MAC实体提供可靠的数据链路。



## 8.4.2 ZigBee协议规范



- ZigBee的技术优势如下。
  - (1) 低功耗。
  - (2) 低成本。
  - (3) 低速率。
  - (4) 近距离。
  - (5) 短时延。
  - (6) 高容量。
  - (7) 高安全。
  - (8) 免执照频段。
- 在交换数据的网络中，有三种典型的设备类型
  - (i) 协调器
  - (ii) 路由器
  - (iii) 终端设备



## 8.4.2 ZigBee协议规范



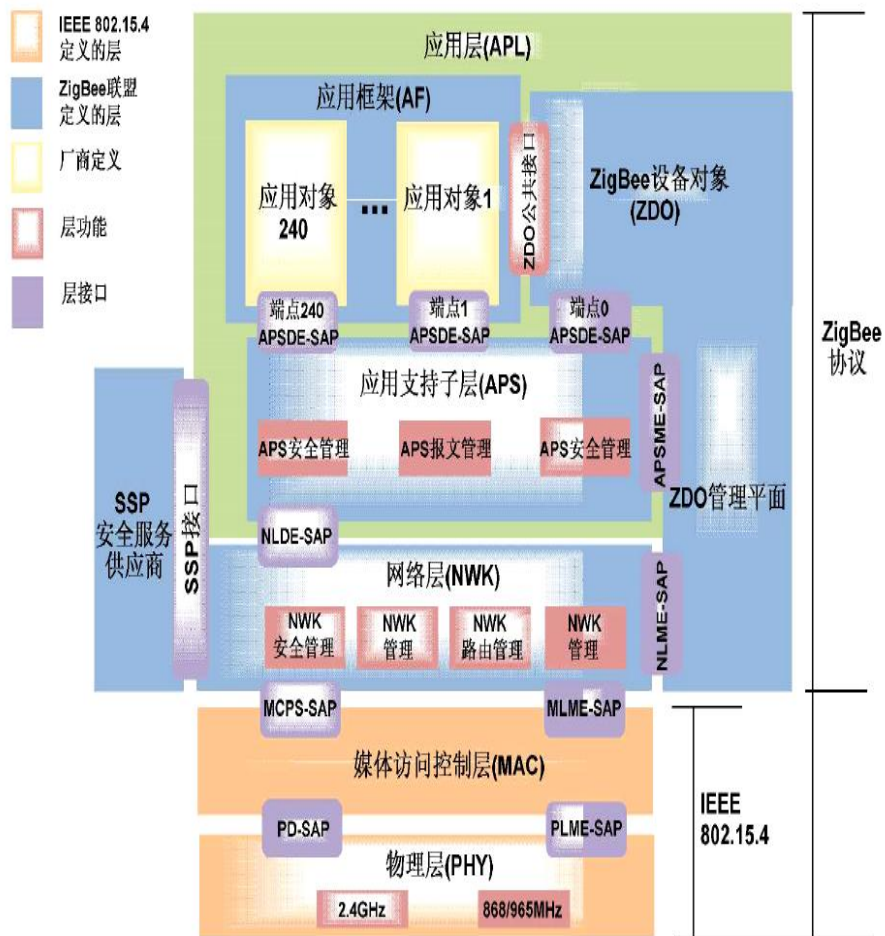
- 协调器用于初始化一个ZigBee网络。它是网络中的第一个设备。协调器节点选择一个信道和一个网络标识符（也叫PAN ID），然后启动一个网络。协调器节点也可以用来在网络中设定安全措施和应用层绑定。
- 路由器的功能有：
  - （i）允许其他设备加入到网络中
  - （ii）多跳路由
  - （iii）协助用电池供电的终端子设备的通信。
- 通常，路由器一直要处于工作状态，因此需要使用干线电源供电。

## 8.4.2 ZigBee协议规范



- 一个终端设备并没有为维持网络的基础结构的特定责任，所以它可以自己选择是休眠还是激活。终端设备仅在向它们的父节点收或者发送数据时才会激活。因此，终端设备可以用电池供电来运行很长一段时间。

## 8.4.2 ZigBee协议规范



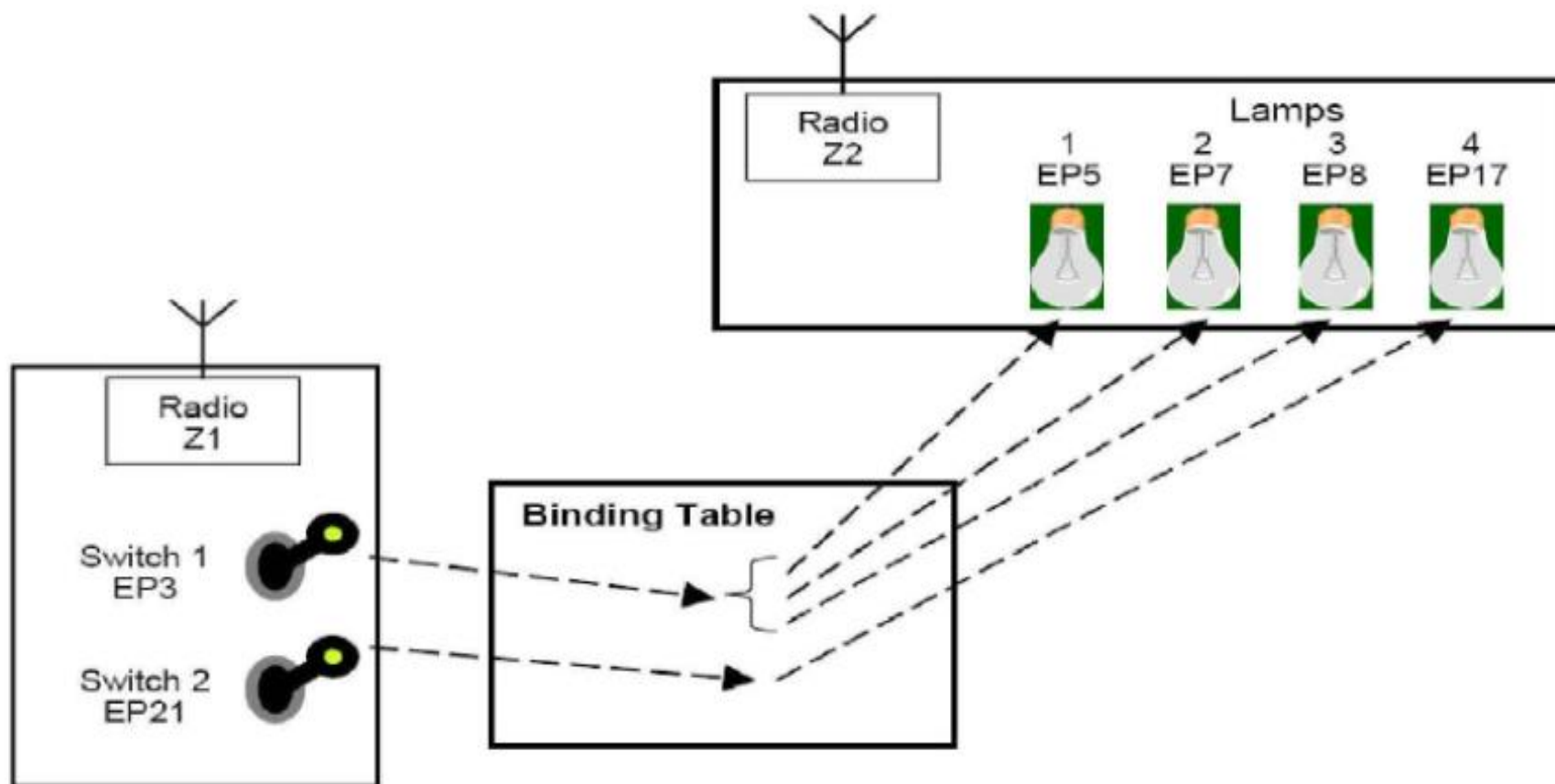
- （1）应用支持子层APS提供了两个接口，分别是：应用支持子层数据实体服务访问点（APSDE-SAP）和应用支持子层管理实体服务访问点（APSME-SAP）。
- （2）ZigBee设备对象（ZDO）的功能包括负责定义网络中设备的角色。还包括对绑定请求的初始化或者响应，在网络设备之间建立安全联系等。
- （3）厂商自定义的应用对象实际上就是运行在ZigBee协议栈上的应用程序。

## 8.4.2 ZigBee协议规范



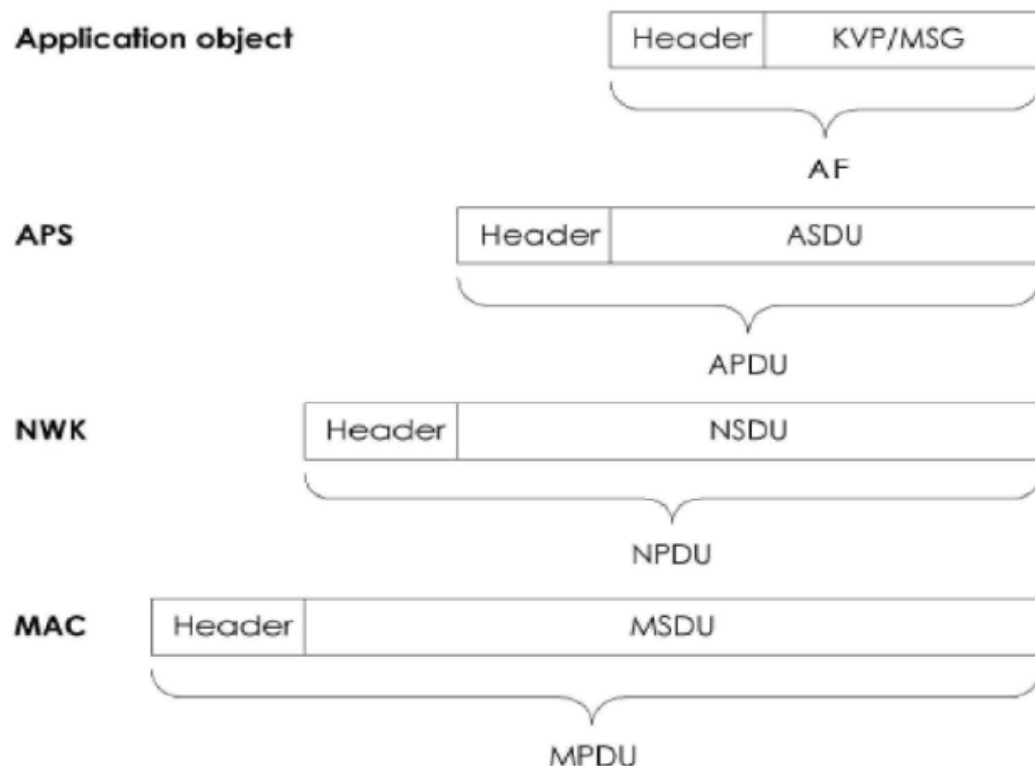
基本术语关系图

## 8.4.2 ZigBee协议规范

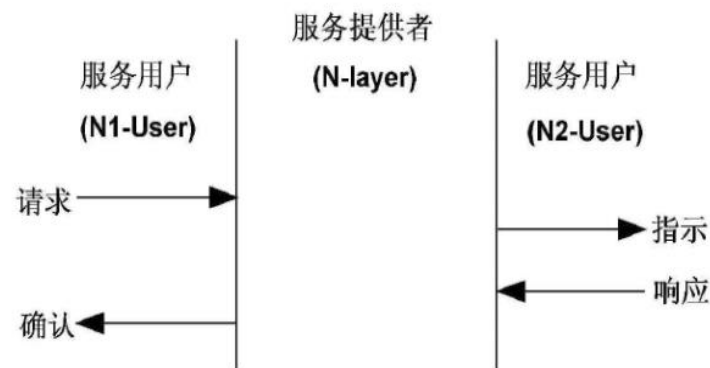


ZigBee绑定操作

## 8.4.2 ZigBee协议规范



### 服务原语



各层帧结构的构成

## 8.5 多传感器网络的信息融合



### 4.5.1 无线传感器网络数据融合

### 4.5.2 无线传感器网络数据融合分类模型



## 8.5.1 无线传感器网络数据融合



数据融合技术是无线传感器网络中实现节能的关键技术，通过去除冗余的数据信息，减少网络通信量，提高能源的有效性。

数据融合具有如下4个显著特点：

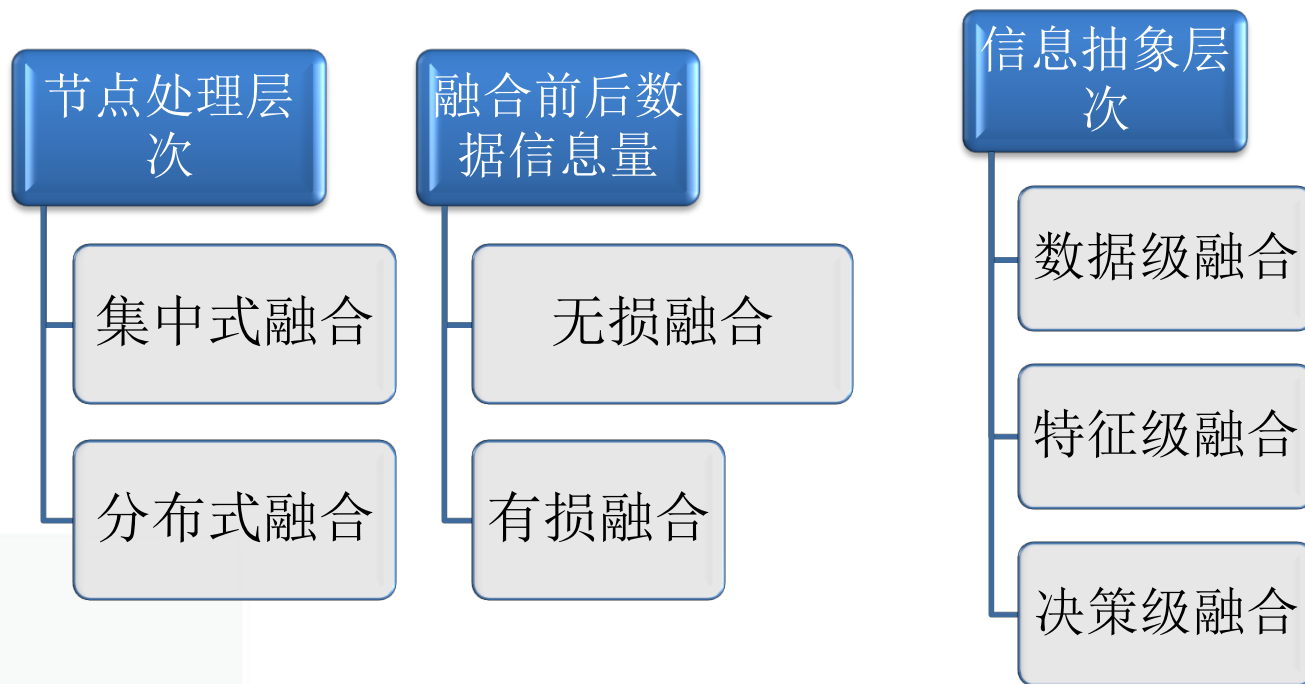
- (1) 信息的冗余性
- (2) 信息的互补性
- (3) 信息处理的及时性
- (4) 信息处理的低成本性



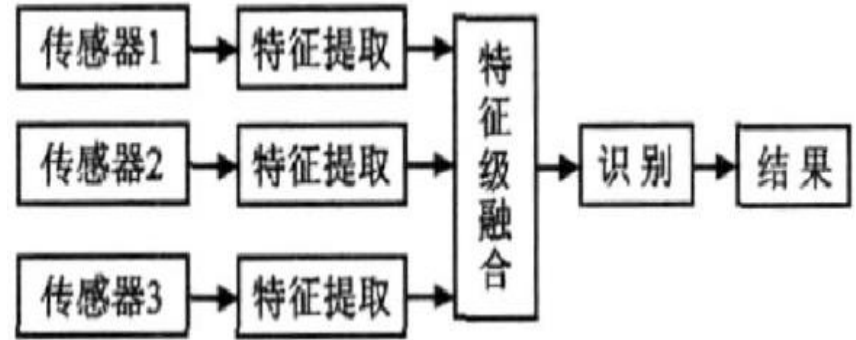
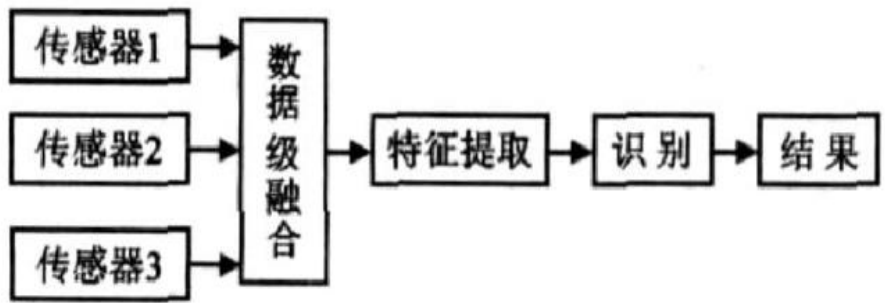
## 8.5.2 无线传感器网络数据融合分类模型



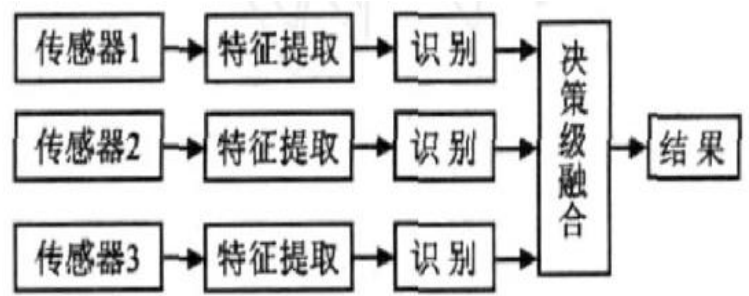
- 根据多传感器数据融合模型定义方法和无线传感器网络自身特点，数据融合可根据节点处理层次、融合前后的数据信息量、信息抽象层次的不同而划分为不同的形式。



# 8.5.2 无线传感器网络数据融合分类模型



融合级别	抽象精度	数据量	实时性	信息损失	容错性	融合度
数据级	高	大	差	小	差	低
特征级	中	中	中	中	中	中
决策级	低	小	好	大	好	高



# 本章小结



本章重点介绍物联网的基础支撑技术—无线传感器网络，

- 首先概述无线传感器网络的体系结构和发展；
- 介绍了其技术体系，这包括自组织网络技术，节点定位技术，时间同步技术和安全技术；
- 阐述无线传感器网络的通信协议，这包括路由协议和MAC协议；
- 介绍了无线传感器网络的技术标准，这包括IEEE802.15.4标准和ZigBee协议规范；
- 最后介绍了多传感器网络信息融合方面的内容。



8-1传感器节点在实现各种网络协议和应用系统时，存在哪些现实约束？

8-2举例说明无线传感器网络的应用领域。

8-3传感器节点由哪几部分组成？

8-4简述无线传感器网络各层协议和功能平台的功能。

8-5无线自组网络具有何显著特点？

8-6基于距离的定位的方法分为：基于TOA的定位、基于TDOA的定位、基于AOA的定位和基于RSSI的定位等，比较这四种方法的优缺点。

8-7无线传感器网络为什么要使用时间同步机制，时间同步机制的主要性能参数包括哪些？

8-8无线传感器网络的安全研究要解决哪些问题？

8-9与传统网络的路由协议相比，无线传感器网络的路由协议具有哪些特点？

8-10四种类型的路由协议分别是什么？



8-11在设计无线传感器网络的MAC协议时，需要着重考虑哪几个方面？

8-12在无线传感器网络中可能造成网络能量浪费的主要原因包括哪几个方面？

8-13按照采用固定分配信道方式还是随机访问信道方式可将传感器网络的MAC协议分为哪三类？

8-14在传感器网络中，为什么要对网络进行拓扑结构控制与优化。

8-15传感器网络拓扑控制主要研究的问题是什么？

8-16 LR-WPAN网络具有哪些特点？

8-17简述IEEE802.15.4定义的LR-WPAN网络中具有两种拓扑结构。

8-18简述ZigBee协议与IEEE802.15.4标准的联系与区别。

8-19数据融合具有哪些显著特点。

8-20根据多传感器数据融合模型定义方法和无线传感器网络自身特点，数据融合可划分为哪些不同的型式？

