



《无线传感器网络技术》讲义

宁波中科无线通信事业部
<http://www.wsn.org.cn>

宁波中科无线通信事业部
<http://www.wsn.org.cn>

第三章、MAC协议

2007年8月20日



中国科学院计算技术研究所

Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences



内容提要

1. 概述
2. 竞争型MAC协议
3. 分配型MAC协议
4. 混合型MAC协议
5. MAC的跨层设计
6. 主要参考文献

1. 概述
2. 竞争型MAC协议
3. 分配型MAC协议
4. 混合型MAC协议
5. MAC的跨层设计
6. 主要参考文献

◆ 网络特征

- ◆ 传感器节点能量受限
- ◆ 传感器节点失效概率大
- ◆ 传感器节点计算处理能力有限
- ◆ 通信带宽有限
- ◆ 以数据为中心
- ◆ 高密度、大规模随机分布

对MAC协议的设计提出了新的挑战!

- ◆ 能量效率
 - ◆ 空闲监听
 - ◆ 冲突
 - ◆ 控制开销
 - ◆ 串扰
- ◆ 可扩展性
- ◆ 网络效率
- ◆ 算法复杂度
- ◆ 与其它层协议的协同

目前普遍认为重要性依次递减！



分类方式

- ◆ 分配信道的方式
 - ◆ 竞争型
 - ◆ 分配型
 - ◆ 混合型
- ◆ 使用的信道数目
 - ◆ 单信道
 - ◆ 双信道
 - ◆ 多信道
- ◆ 网络类型
 - ◆ 同步网络
 - ◆ 异步网络

1. 概述
2. 竞争型MAC协议
3. 分配型MAC协议
4. 混合型MAC协议
5. MAC的跨层设计
6. 主要参考文献

◆ 基本思想

- ◆ 发送时主动抢占，CSMA方式
- ◆ 按需分配

◆ 优点

- ◆ 网络流量和规模变化自适应
- ◆ 网络拓扑变化自适应
- ◆ 算法较简单

◆ 典型协议

- ◆ SMAC、TMAC、PMAC、WiseMAC、Sift



SMAC协议-基本思想

- ◆ 周期性睡眠和监听
- ◆ 串扰避免
- ◆ 消息传递

- ◆ 周期性睡眠和监听
 - ◆ 一个周期内有睡眠和监听两种状态
 - ◆ 节点之间协同，保持监听同步
 - ◆ 同步调度，形成虚拟簇
 - ◆ 全监听周期，保证邻居发现
 - ◆ 降低功耗，增加延迟



图 3-1 周期性监听和睡眠

◆ 自适应监听

在一次通信过程中，通信节点的邻居在此次通信结束后唤醒并保持监听一段时间。如果节点在这段时间接收到RTS帧，则可以立即接收数据，而不需要等到下一个监听周期，从而减少了两个节点间的数据传输延迟。

◆ 串扰避免

- ◆ 虚拟载波监听
- ◆ 信道忙时睡眠，避免接收串扰数据包



消息传递

- ◆ 将长的信息包分成若干个短的DATA段
- ◆ 所有DATA使用一个RTS / CTS控制分组占用信道
- ◆ 每个DATA都有ACK保障传输成功

◆ GSA算法

- ◆ 减少网络中的调度方式，以减少边界节点的能量损耗
- ◆ 节点地址与存在时间结合
- ◆ 经过同步， 形成全局调度方式



FPA算法

- ◆ 消除多跳延迟
- ◆ 建立快速路径
- ◆ 数据在快速路径多跳传输

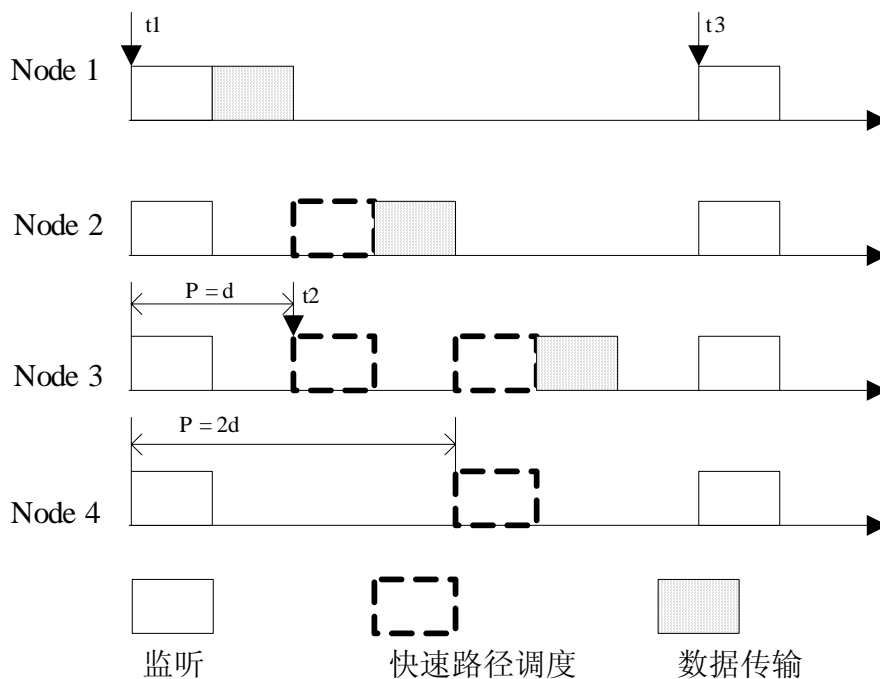


图 3-3 快速路径调度

- ◆ SMAC协议调度占空比固定，不能很好的适应网络流量的变化
- ◆ 动态调整调度周期中的活跃时间长度
- ◆ 在TA时间内没有发生激活事件则进入睡眠

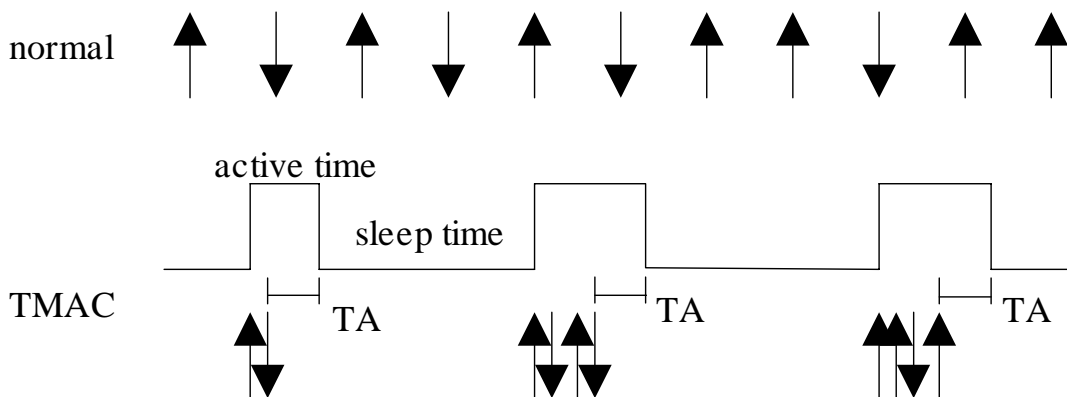


图 3-4 TMAC基本机制

◆ 周期性监听同步

- ◆ 延用SMAC协议思想，周期性广播SYNC帧
- ◆ 固定周期调度后全监听周期，发现邻居

◆ RTS操作和TA的选择

- ◆ 发送RTS未收到CTS，应再发送一次
- ◆ $TA > \text{竞争信道时间} + \text{RTS发送时间} + \text{CTS准备时间}$

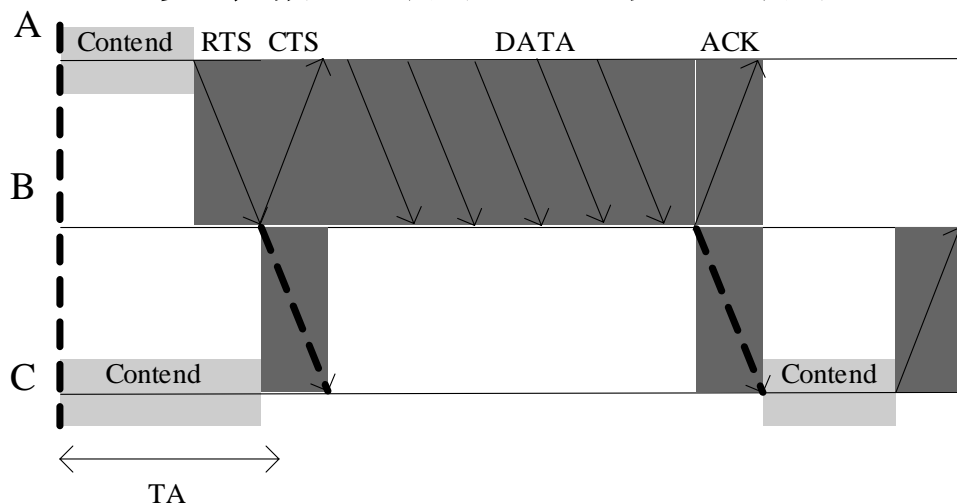


图 3-5 TMAC基本数据交换

◆ 早睡问题

- ◆ 节点在邻居准备向其发送数据时进入了睡眠状态

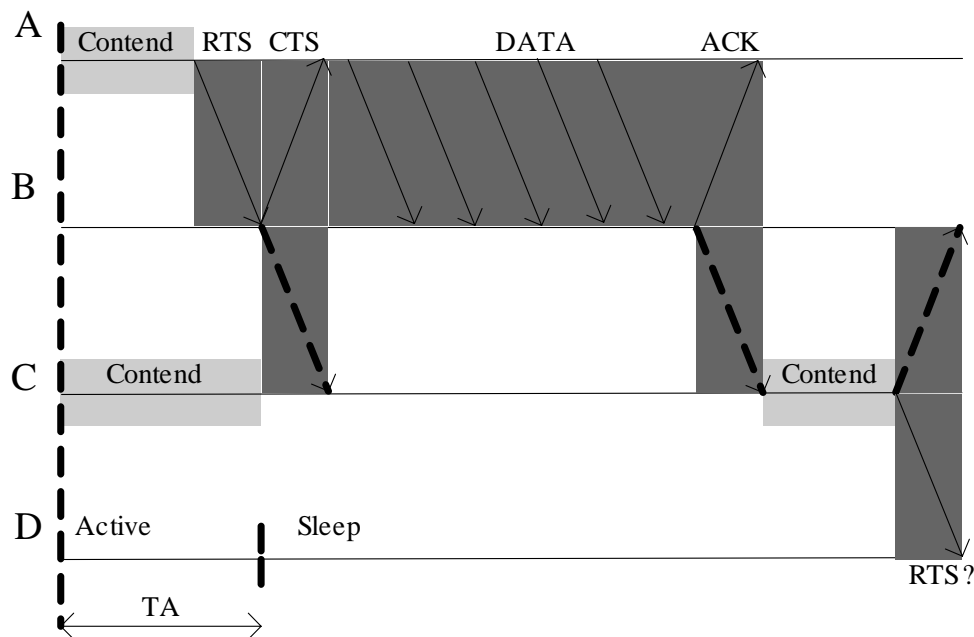


图 3-6 早睡问题



早睡问题解决办法

- ◆ 未来请求发送 (Future request-to-send, FRTS)

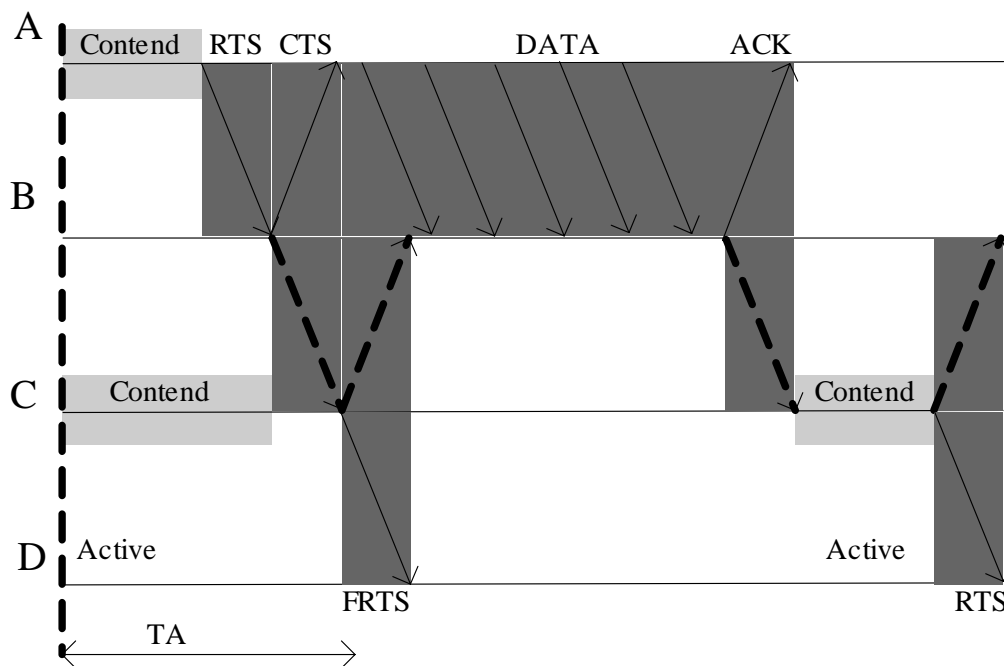


图 3-7 FRTS帧交换

◆ 早睡问题解决办法

- ◆ 满缓冲区优先

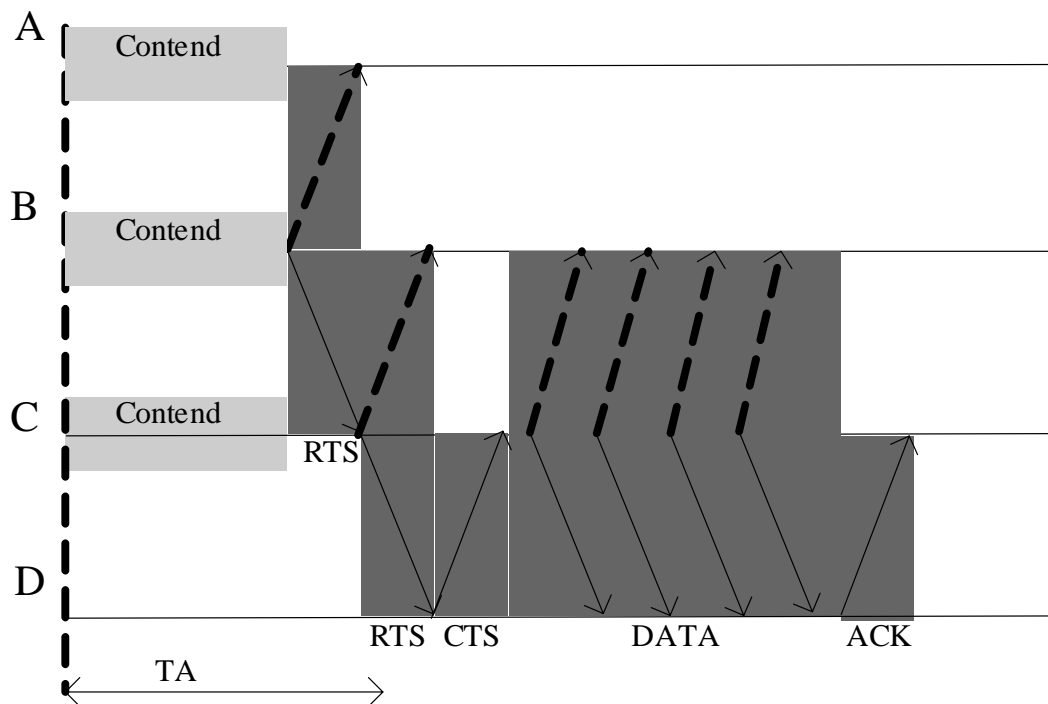


图 3-8 接收RTS节点优先

- ◆ SMAC调度占空比固定，TMAC早睡问题
- ◆ 引入模式信息，节点能够通过模式信息提前获知邻居的下一步活动，调度都根据模式信息来进行

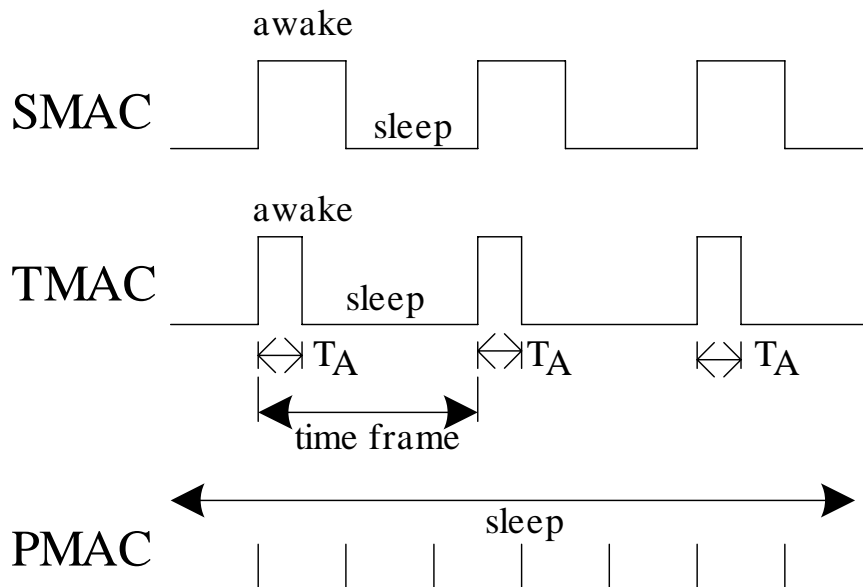


图 3-9 空闲监听周期长度比较

◆ 模式的生成

- ◆ 由一个二进制位串组成
- ◆ 每一位表示节点在当前时隙应处于何种状态，1为监听，0为睡眠
- ◆ 形式： $0m1$ ， $m=0,1,\dots,N-1$ ， m 代表串中0的个数
- ◆ 每个节点启动时的模式串为1，表示流量很大
- ◆ 节点根据网络流量更新模式
 - 在第一个时隙内无数据发送：更新模式为 01
 - 在第二个模式中监听时隙内仍无数据发送：更新模式为 001；依此类推

◆ 模式的交换

- ◆ 在当前周期结束时将进行广播来交换模式信息
- ◆ 引入超帧STF,分为两个子帧 PRTF和PETF
- ◆ 模式重复时间帧PRTF, 节点重复自己的模式
- ◆ 模式交换时间帧, 邻居之间进行模式信息交换

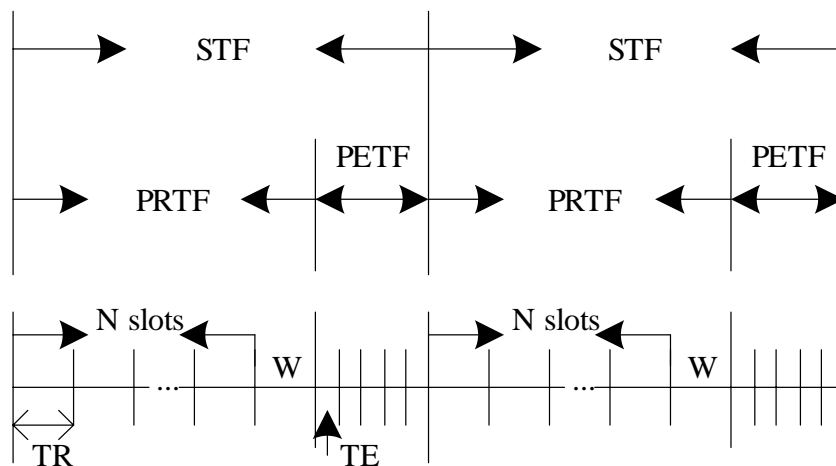


图 3-10 时间帧划分



WiseMAC协议-基本思想

- ◆ 基于CSMA机制，使用前导采样技术
- ◆ 通过本地同步的广播获得最小的前导长度
- ◆ 随机的前导长度保证冲突避免

◆ 前导采样

- ◆ 对信道进行采样，在短时间内对无线信道进行监听
- ◆ 所有节点都保持相同的采样时间 T_w
- ◆ 采样时监听到信道忙，节点会继续监听，直到接收到数据或者信道空闲
- ◆ 数据包发送之前都要发送一个唤醒前导序列，该序列的长度和采样周期的长度相等，保证在数据部分到达时节点处于监听状态

- ◆ 前导长度最小化
 - ◆ 根据邻居节点的采样时间偏移量，选择最小长度的唤醒前导

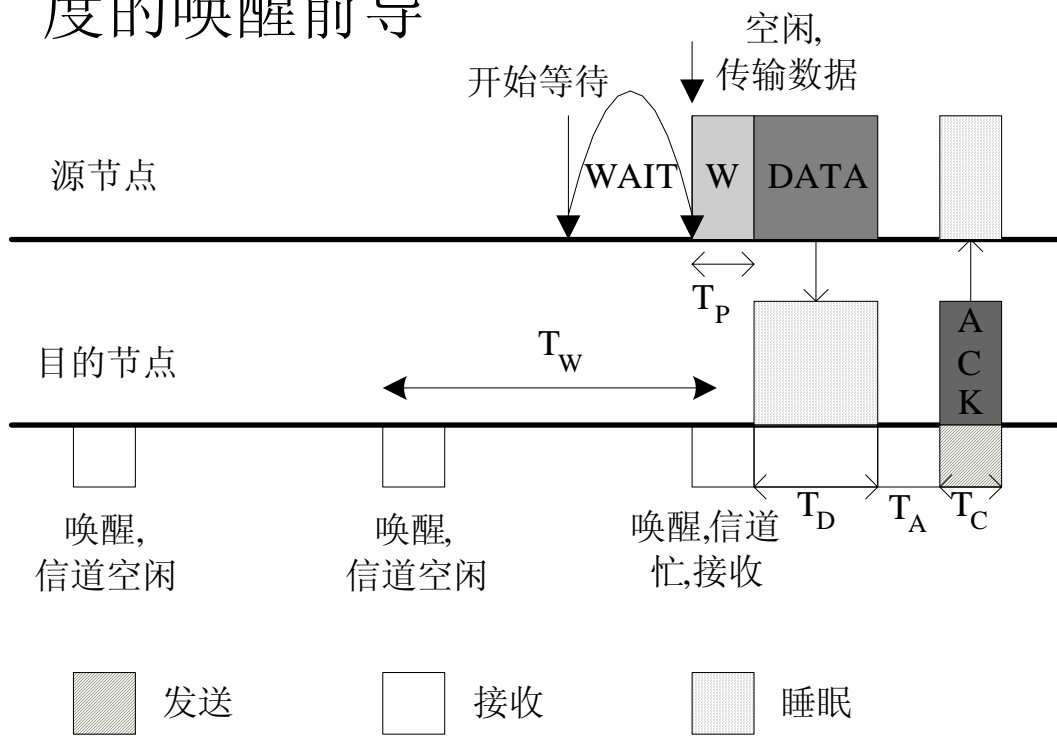


图 3-11 同步前导采样

- ◆ 适用于事件驱动型传感器网络
- ◆ 出发点
 - ◆ 空间相关性
 - ◆ 并非每个节点都要报告事件
 - ◆ 时变性
- ◆ 设计目的
 - ◆ N个节点同时监测到一个事件，希望在最短时间内有R个节点($R \leq N$)无冲突发送事件消息

◆ 常规CSMA协议

- ◆ 在 $[1, CW]$ 时间长度窗口内，等概率选择发送时槽
- ◆ 冲突时就倍增时间窗口大小 CW ，等概率选取发送时间

◆ Sift协议

- ◆ 固定长度的竞争窗口
- ◆ 不等概率选择时槽，在不同时槽采用不同的选择概率

- ◆ 假设目前参与竞争的节点数 N ，竞争时间窗口 $[1, CW]$ 中的时隙。如果第一个时隙没有节点发送数据节点减小竞争节点数假设值，增加在第二个时隙中的传输概率，这一过程中每个时隙中都重复执行。
- ◆ 当信道空闲时，节点根据概率分布在传输之前退避随机长度。
- ◆ 假设每个节点选择时隙 $r \in [1, CW]$ 发送数据的概率为 P_r 。 P_r 的概率分布如下：

$$P_r = \frac{(1-\alpha)\alpha^{CW}}{1-\alpha^{CW}} \cdot \alpha^{-r} \quad (r = 1, \dots, CW)$$

1. 概述
2. 竞争型MAC协议
3. 分配型MAC协议
4. 混合型MAC协议
5. MAC的跨层设计
6. 主要参考文献

◆ 基本思想

- ◆ 将一个物理信道分为多个子信道
- ◆ 将子信道静态或动态地分配给需要通信的节点，避免冲突
- ◆ 根据网络通信流量最大限度地节省能量

◆ 优点

- ◆ 无冲突
- ◆ 无隐藏终端问题
- ◆ 易于休眠

◆ 典型协议

- ◆ SMACS、TRAMA、DMAC、BMAC

SMACS协议-基本思想1

- ◆ 结合TDMA、FDMA的基本思想
- ◆ 假设每个节点都能在多个载波频点上进行切换
- ◆ 将每个双向信道定义为两个时间段
- ◆ 发现邻居后立即分配信道
- ◆ 每个链路都分配一个随机选择的频点，相邻链路都有不同的工作频点

◆ 链路建立

- ◆ 引入超帧的概念，用固定参数 T_{frame} 表示
- ◆ 在上电后先进行邻居发现，每发现一个邻居就有一对节点形成一个双向信道
- ◆ 在两个节点的超帧中为该链路分配一对时隙用于双向通信，这种不同步的时隙分配称为异步分配通信
- ◆ 每对时隙都会选择一个随机的频点，减少邻近链路冲突的可能

链路建立

- ◆ 节点A和D分别在 T_d 和 T_a 时刻开始进行邻居发现
- ◆ 节点B和C分别在 T_b 和 T_c 时刻开始进行邻居发现
- ◆ 两个时隙分配不同的频点 f_x 和 f_y

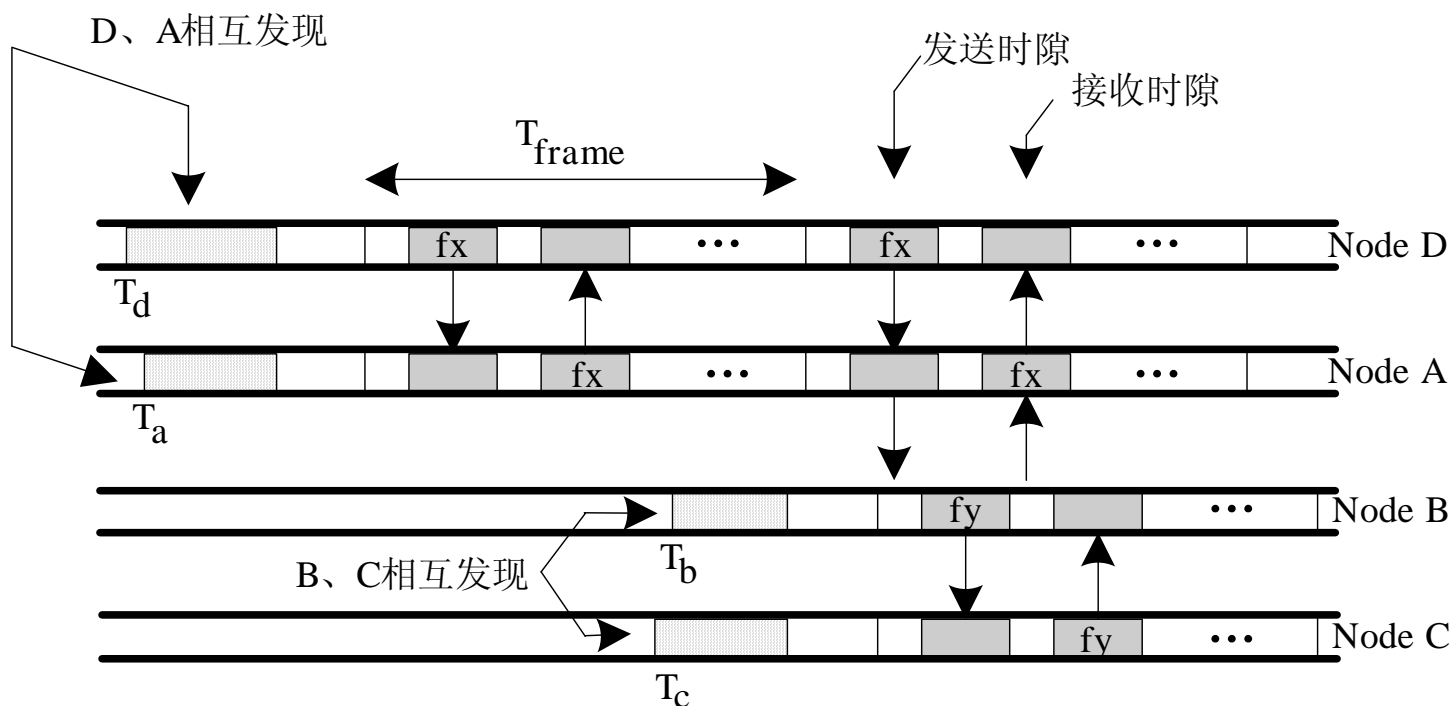


图 3-17 异步分配通信

◆ 邻居发现和信道分配

- ◆ 假设节点B, C, G进行邻居发现。节点在随机的时间段内打开射频部分, 在一个固定的频点监听一个随机长度的时间。节点C在监听结束后广播一个邀请消息Type1
- ◆ 节点B和G接收到C发出的Type1消息后, 等待一个随机的时间, 然后各自广播一个应答消息Type2
- ◆ C将接收到B和G发来的邀请应答, 可以选择最早到达的应答者, 也可以选择接收信号强度最大的应答者。在选择了应答者后C将立即发送一个Type3给最早到达的B, Type3消息中携带分配信息, 该信息包含节点C的下一个超帧的起始时间
- ◆ 节点B根据Type3得到一个时间偏移, 并找出两个共同的空闲时间段做为时隙对, 分配给B和C之间的链路。

◆ 邻居发现和信道分配

- ◆ 节点B选择一个随机的频点，将时隙对在超帧中的位置信息以及选择的频点通过Type4发送给节点C。这些信息成功交换之后，B和C之间就完成了时隙分配和频率选择，可以切换到对应的时隙和频率进行通信。

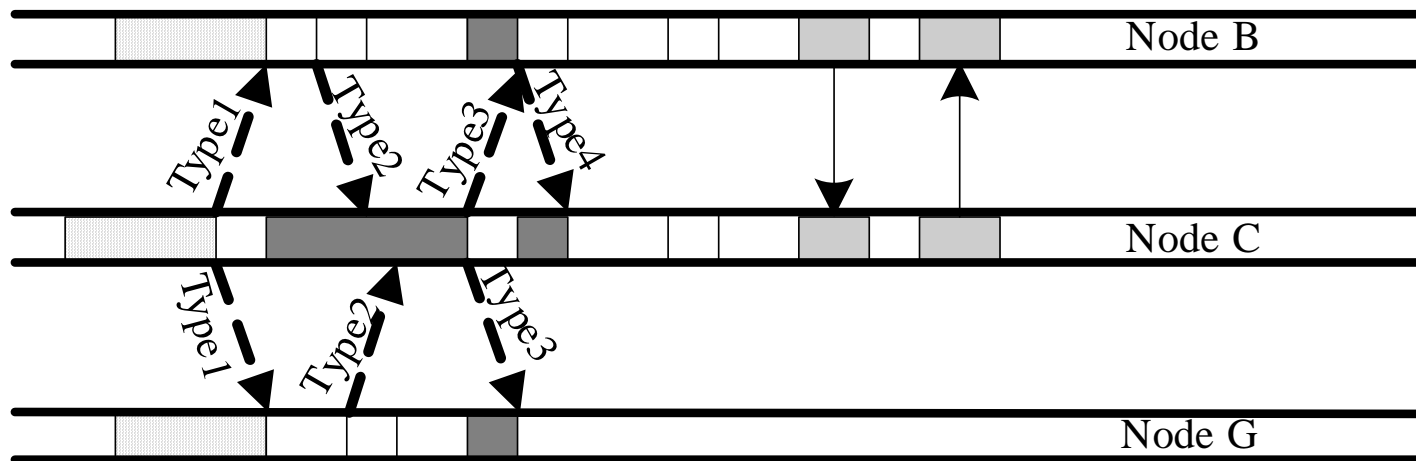


图 3-18 邻居发现

◆ NP协议

- ◆ 节点启动后处于随机接入时隙，此时节点为接收状态
- ◆ 通过在随机接入时隙中交换控制信息，NP协议实现邻居信息的交互。控制信息中携带了增加的邻居的更新，如果没有更新，控制信息作为通知邻居自己存在的信标
- ◆ 节点之间的时钟同步信息也是在随机接入时隙中发送
- ◆ 每个节点发送关于自己下一跳邻居的增加更新，可以用来保持邻居之间的连通性。如果节点在一段时间内都没有再收到某个邻居的信标，则该邻居失效。

◆ 分配交换协议

- ◆ 建立和维护发送者和接收者选择时需要的分配信息，包括分配信息生成和分配的信息交换与维护
- ◆ 根据高层应用产生数据的速率计算出一个分配间隔，确定可分配的时隙数，生成分配信息
- ◆ 节点通过分配帧广播分配信息
- ◆ 节点根据接收到的广播维护下一跳邻居的分配信息

◆ AEA算法

- ◆ 确定节点当前时隙应处于发送、接收还是睡眠状态

DMAC协议-基本思想

- ◆ 适合于节点采集数据后，向一个sink节点汇聚的单向树状模式
- ◆ 采用预先分配的方法来避免睡眠延迟
- ◆ 引入了一种交错的监听睡眠调度机制，保证数据在多跳路径上的连续传输

- ◆ 交错唤醒机制
 - ◆ 假设网络中的节点保持静止，且每个路由节点有足够的存活时间，可以在较长时间内保持网络路径不发生变化
 - ◆ 假设数据由传感器节点向唯一的sink单向传输
 - ◆ 假设各个节点之间保持时钟同步

交错唤醒机制

- ◆ 在一个多跳传输路径上，各个节点交错唤醒，如同链锁一样环环相扣，保证数据在树状结构上能持续传输，不被睡眠所中断
- ◆ 每个间隔分为接收、发送和睡眠三个周期。

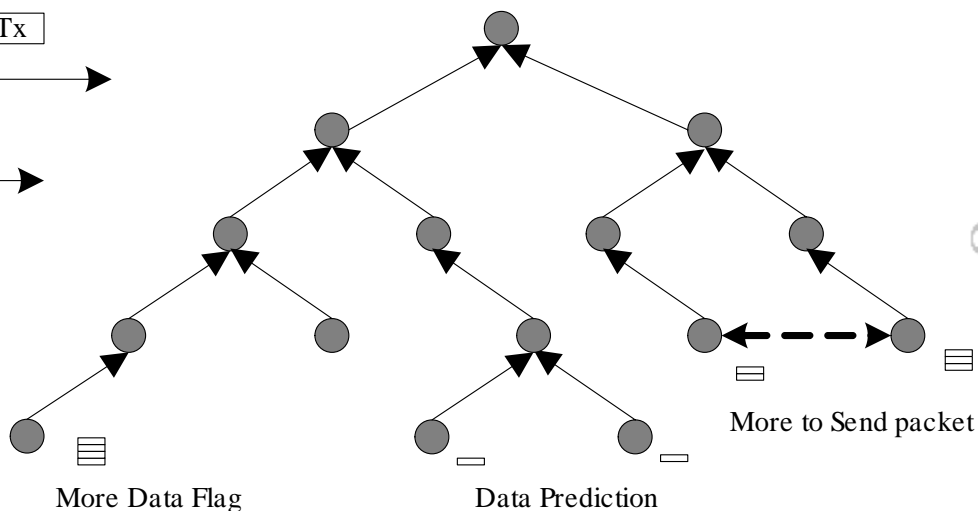
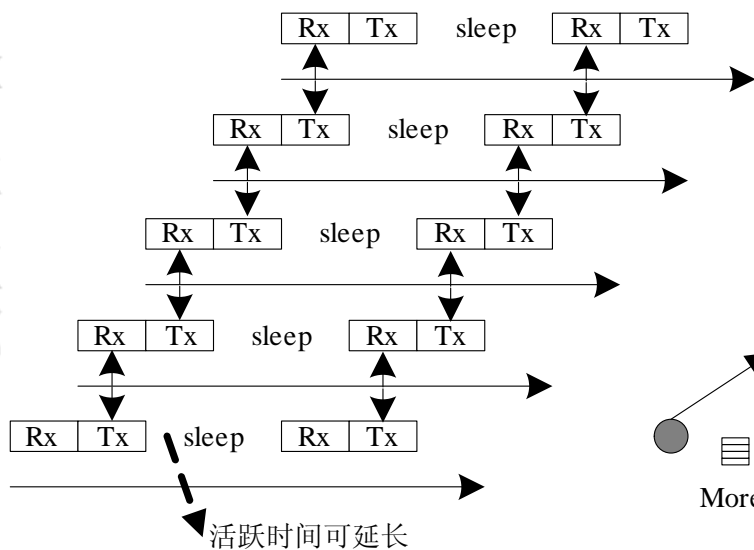


图 3-23 DMAC协议基本机制

- ◆ 自适应占空比机制
 - ◆ 如果节点在一个发送周期内有多个数据包要发送，就需要该节点和树状路径上的上层节点一起加大发送周期占空比
 - ◆ 通过在MAC层数据帧的帧头加入一个标记 (more data flag)，以较小的控制开销发送占空比更新请求。在ACK帧中加入同样的标记位

◆ 数据预测机制

- ◆ 在数据采集树中，越靠近上层的节点，汇聚的数据越多，对树的底层节点适合的占空比不一定适合中间节点
- ◆ 如果一个节点在接收状态下接收到一个数据包，该节点预测子节点仍有数据等待发送。在发送周期结束后再等待 $3u$ 个周期，节点重新切换到接收状态

◆ MTS帧机制

- ◆ 必要性：虽然自适应占空比机制和数据预测机制考虑了冲突避免，数据采集树中不同分枝节点仍有冲突的可能
- ◆ MTS帧只包含目的地址和MTS标志位。标志位为1时称为MTS请求，标志位为0时称为MTS清除
- ◆ 发送或接收到MTS请求的节点每隔 $3u$ 个周期就唤醒一次，只有MTS请求已经被清除时，节点才回到原来的占空比方式

1. 概述
2. 竞争型MAC协议
3. 分配型MAC协议
4. 混合型MAC协议
5. MAC的跨层设计
6. 主要参考文献

ZMAC协议-基本思想

- ◆ 采用CSMA机制作为基本方法
- ◆ 竞争加剧时使用TDMA机制
- ◆ 引入时间帧，为节点分配时隙
- ◆ 节点可以选择任何时隙发送数据
- ◆ 在分配的时隙发送优先级更高



ZMAC协议-关键技术1

宁波中科无线通信事业部
<http://www.wsn.org.cn>

宁波中科无线通信事业部
<http://www.wsn.org.cn>

◆ 邻居发现

- ◆ 周期性发送PING消息
- ◆ 包含本地发现的所有一跳范围内的邻居

◆ 时隙分配

- ◆ DRAND算法



本地时间帧交换

- ◆ 节点维持一个本地的时间帧长度
- ◆ 帧长度与两跳范围内的节点数相对应
- ◆ 实现时隙的同步需要运行时钟同步算法

◆ 传输控制

- ◆ 低冲突级别(LCL)和高冲突级别(HCL)两种工作模式
- ◆ 时隙拥有者，短时间监听，优先发送
- ◆ 非时隙拥有者LCL模式，退避较长时间再监听
- ◆ 非时隙拥有者HCL模式，等待下个时隙



局部同步

- ◆ 完全失去时钟同步时，退化为CSMA协议
- ◆ 维护临近的发送节点之间的时间同步
- ◆ 周期性的发送时间同步包
- ◆ 根据时间同步包修正时间偏差

1. 概述
2. 竞争型MAC协议
3. 分配型MAC协议
4. 混合型MAC协议
5. MAC的跨层设计
6. 主要参考文献

◆ 基本思想

- ◆ 为了提高能量效率，能量管理机制、低功耗设计等在各层设计中都有所体现
- ◆ 传统方法中各层的设计相互独立，因此各层的优化设计并不能保证整个网络的设计最优
- ◆ 实现逻辑上并不相邻的协议层次间的设计互动与性能平衡

◆ 典型协议

- ◆ MINA

- ◆ 节点分成三种类型
 - ◆ 大量静止的低容量(内存、CPU、能量)传感器节点
 - ◆ 少量手持移动节点(PDA)
 - ◆ 静止的大容量基站节点
- ◆ 每个传感器节点都带有一个半双工或全双工的射频收发器，节点之间都能进行双向通信
- ◆ 每个节点都有一个唯一的网络地址
- ◆ 一个传感器节点的簇定义为在该节点广播传输范围内的节点的集合
- ◆ 基站是无线传感器网络的数据汇聚节点，可以将数据发送到有线网络中去，基站节点必须具有超长的传输距离，通过一个广播可将数据发送给网络中的所有节点

MINA网络架构2

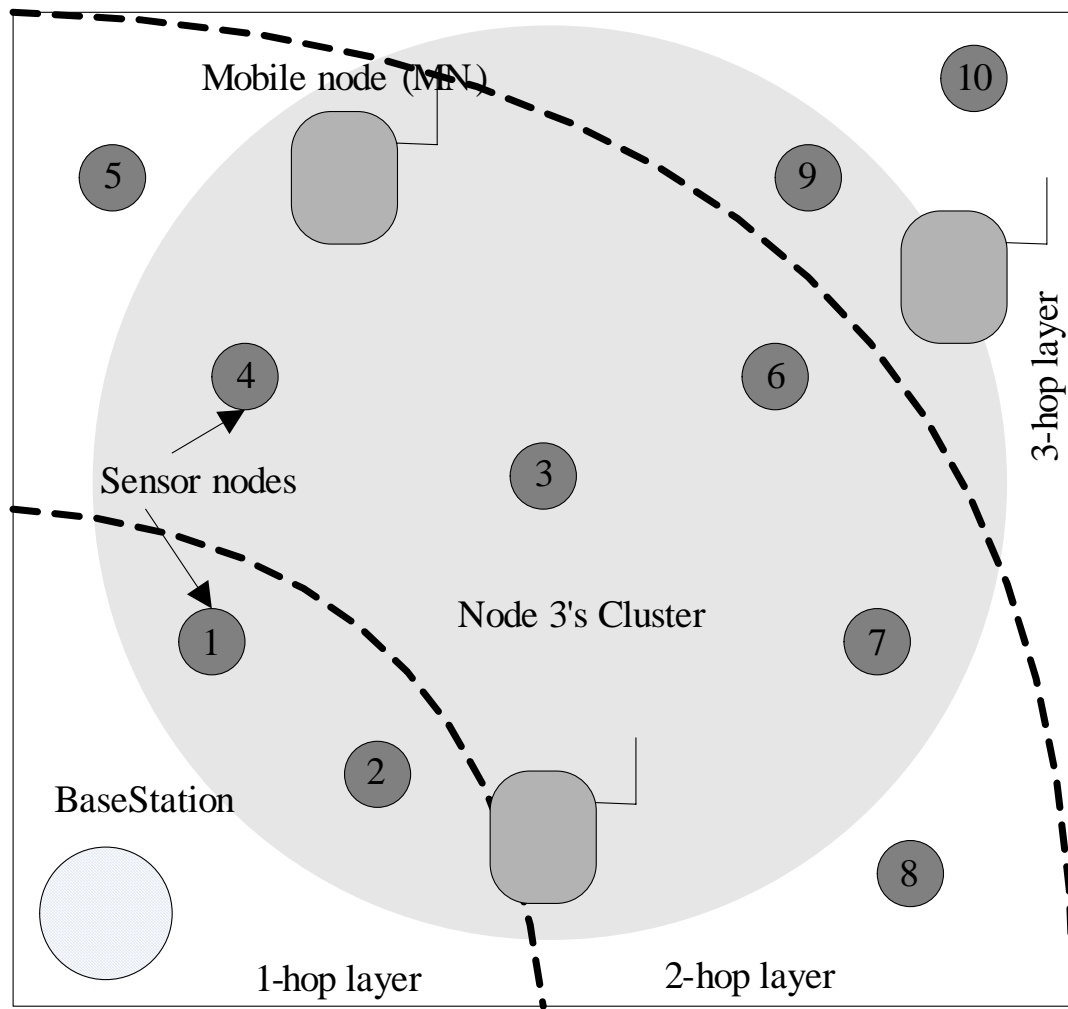


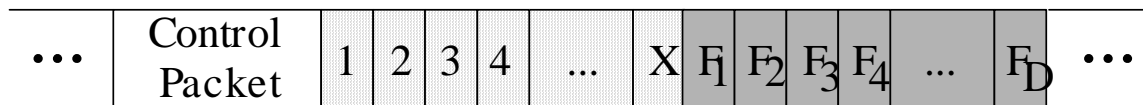
图 3-24 MINA架构组网示例

- ◆ 流量类型主要为传感器节点到基站的上行链路
- ◆ 网络帧类型有三种
 - ◆ 控制帧
 - ◆ 信标帧
 - ◆ 数据帧
- ◆ 分层架构
 - ◆ 距离基站跳数相同的节点组成一层
 - ◆ 每个节点的邻居也可以分为三类：内部邻居、同等邻居、外部邻居。距离基站跳数比本地更小的邻居为内部邻居，跳数相同的邻居为同等邻居，跳数更大的邻居为外部邻居

- ◆ 网络主要工作在两个交替的状态
 - ◆ 网络自组织状态，在此期间节点发现邻居
 - ◆ 数据传输状态，在此期间节点进行数据的发送或接收，需要路由协议来确定目的地址，MAC协议来完成信道访问

◆ MAC协议超帧

超帧结构



■ 数据帧 □ 信标帧

信标帧结构

| | | | | | |
|----|--------|----------------|------------------|---------------|-----------------------------------|
| ID | Energy | H _c | Receiver Channel | Buffer Status | Slot allocation for OUTWARD nodes |
|----|--------|----------------|------------------|---------------|-----------------------------------|

图 3-25 MAC协议帧结构

◆ 网络自组织

- ◆ 在每个超帧的起始阶段，基站广播一个控制帧CR (Control Packet)。CR包括传感器节点同步需要的时间信息，以及传感器节点在信标帧BI(Beacon Packet)内传输各自的信标信息的序号
- ◆ BI紧跟在CR后，每个节点根据CR中的顺序发送BI，帧格式如图 3-25示。BI包含了节点的能量状态、距离基站的跳数、节点的接收信道信息
- ◆ 在信标帧后紧跟着就是数据传输帧。每个数据帧包括 β 个时隙，由MAC协议来负责分配
- ◆ 基站启动后第一个超帧期间进行第一轮BI信息交互时，基站获得了第一层节点的信息。第二个超帧期间重复上述步骤，第一层节点发送带有跳数信息为1的BI信息。第二层的节点接收到该信息并将自己的跳数设置为2，第二层节点就形成了。超帧周期性的重复，假设网络最大跳数为N，第N个超帧完毕后，整个网络的自组织过程就完成了

◆ MAC协议DTROC

- ◆ 假设网络总共有 L 层，节点 i 位于 l 层，且 $l < L$
- ◆ S_i 表示第 $l+1$ 层中将节点 i 选择为下一跳地址的节点的集合
- ◆ 分配一个信道 C_i 给节点 i 的接收机，同时 S_i 中每个节点都将发射机调整到这个信道
- ◆ 主要解决两个问题：在 S_i 中共享信道 C_i ；分配信道时避免相互干扰

1. 概述
2. 竞争型MAC协议
3. 分配型MAC协议
4. 混合型MAC协议
5. MAC的跨层设计
6. 主要参考文献

- [1] Demirkol, I. Ersoy, C. Alagoz F. "MAC protocols for wireless sensor networks: a survey", [Communications Magazine, IEEE](#) April 2006, Volume: 44, Issue: 4, On page(s): 115- 121
- [2] W. Ye, J. Heidemann and D. Estrin, "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," in INFOCOM 2002, New York, Jun. 2002,pp.1567-1576.(SMAC)
- [3] W. Ye, J. Heidemann, D. Estrin, "Medium Access Control With Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks", [IEEE/ACM Transactions on Networking](#), Volume: 12, Issue: 3, Pages:493 - 506, June 2004.
- [4] Yuan Li Wei Ye Heidemann, "Energy and latency control in low duty cycle MAC protocols", [Wireless Communications and Networking Conference, 2005 IEEE](#), Publication Date: 13-17 March 2005. Volume: 2, Page(s): 676- 682 Vol. 2
- [5] T.V. Dam and K. Langendoen, "An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks", The First ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys'03), Los Angeles, CA, USA, November, 2003.
- [6] Zheng T,Radhakrishnan S,Sarangan V. PMAC:an adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[A].Proceedings of the 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium[C].Piscataway,USA:IEEE,2005.237.
- [7] EI-Hoiydi A, Decotignie J D. WiseMAC: An Ultra Low Power MAC Protocol for the Downlink of Infrastructure Wireless Sensor Networks [A].Proceedings of 9th International Symposium on Computers and Communications, Vol 1 [C].
- [8] C. C. Enz, A. El-Hoiydi, J-D. Decotignie, V. Peiris, "WiseNET: An Ultralow-Power Wireless Sensor Network Solution", [IEEE Computer](#), Volume: 37, Issue: 8, August 2004.
- [9] K. Jamieson, H. Balakrishnan, and Y. C. Tay, "Sift: A MAC Protocol for Event-Driven Wireless Sensor Networks," MIT Laboratory for Computer Science, Tech. Rep. 894, May 2003,<http://www.lcs.mit.edu/publications/pubs/pdf/MIT-LCS-TR-894.pdf>.

主要参考文献

- [10] [Sohrabi K Ailawadhi V Ailawadhi V](#), “[Protocols for self-organization of a wireless sensor network](#)”, 《[IEEE Personal Comm Mag](#)》, 2000/7/5 P 16-27.
- [11] V. Rajendran, K. Obraczka, J.J. Garcia-Luna-Aceves, “Energy-Efficient, Collision-Free Medium Access Control for Wireless Sensor Networks”, Proc. ACM SenSys 03, Pages:181 - 192, Los Angeles, California, 5-7 November 2003.
- [12] L. Bao and J. Garcia-Luna-Aceves. Hybrid channel access scheduling in ad hoc networks. Proc. IEEE Tenth International Conference on Network Protocols (ICNP), November 2002.
- [13] L. Bao and J. J. Garcia-Luna-Aceves. A new approach to channel access scheduling for ad hoc networks. In The seventh annual international conference on Mobile computing and networking 2001, pages 210{221, 2001.
- [14] G. Lu, B. Krishnamachari, C.S. Raghavendra, “An adaptive energy efficient and low-latency MAC for data gathering in wireless sensor networks”, Proceedings of 18th International Parallel and Distributed Processing Symposium, Pages: 224, 26-30 April 2004.
- [15] I. Rhee, A. Warriar, M. Aia, and J. Min, “Z-MAC:a hybrid mac for wireless sensor networks,” in ACM Sensys’05, (San Diego, USA), november 2005.
- [16] I. Rhee, A. Warriar, and L. Xu. Randomized dining philosophers to TDMA scheduling in wireless sensor networks. Technical report, Computer Science Department, North Carolina State University, Raleigh, NC, 2004.
- [17] J. Ding, K. Sivalingam, R. Kashyapa, L. J. Chuan, “A multi-layered architecture and protocols for large-scale wireless sensor networks”, IEEE 58th Vehicular Technology Conference, 2003, VTC 2003-Fall 2003, Volume: 3, Pages:1443 - 1447, 6-9 Oct. 2003.



宁波中科无线通信事业部
<http://www.wsn.org.cn>

谢谢!

宁波中科无线通信事业部
<http://www.wsn.org.cn>