

第二章 2.3 MAC层技术介绍 - 备课笔记（提纲版）

课程信息

- 课程名称：传感器网络技术与应用
- 章节：第2章 2.3 MAC层技术介绍
- 课时：6课时（300分钟），每2课时为1节课，共3节课
- 学生背景：已学习2.2节物理层内容，了解无线信道特性和调制技术

教学目标

1. 理解数据链路层的功能和在WSN协议栈中的位置
2. 掌握MAC协议的分类方法（静态vs动态、基于竞争vs基于调度）
3. 深入理解CSMA/CD的原理及其在无线网络中的局限性
4. 掌握CSMA/CA的工作机制（RTS/CTS、NAV、退避算法）
5. 掌握S-MAC、T-MAC等WSN专用MAC协议的设计思想和核心机制
6. 能够根据应用场景选择合适的MAC协议

重难点

- 重点：隐蔽站/暴露站问题、RTS/CTS机制、S-MAC周期性睡眠、T-MAC自适应机制
- 难点：理解为什么CSMA/CD不适合无线网络、Z-MAC的混合调度机制

第一节课（100分钟）：数据链路层概述与MAC协议分类

第1课时：2.3.1 数据链路层概述（50分钟）

一、课程引入（5分钟）

内容要点

- 回顾OSI七层模型和2.2节物理层内容
- 物理层解决“如何传输比特”，数据链路层解决“如何可靠传输帧”
- 引出问题：多个节点如何共享同一个无线信道？

衔接语

“上一节我们学习了物理层，知道了比特是如何通过无线电波传输的。但是，如果多个传感器节点同时发送数据会怎样？会不会‘打架’？今天我们学习数据链路层，看看它是如何解决这个问题的。”

二、数据链路层定义与功能（15分钟）

2.1 数据链路层定义

内容要点：

- 位于物理层之上、网络层之下
- 将物理层提供的可能出错的物理连接，改造成逻辑上无差错的数据链路
- 以“帧”为单位传输数据

教学建议：

- 用“快递包装”类比：物理层是道路，数据链路层是包装和运输规则

2.2 数据链路层主要功能**内容要点（五大功能）：**

功能	说明	类比
封装成帧	将网络层数据加上帧头帧尾	给信件装信封
透明传输	特殊字符的转义处理	避免歧义
差错控制	检测和纠正传输错误	核对收据
流量控制	控制发送速率	别发太快
链路管理	建立、维护、释放链路	打电话流程

三、帧结构与MAC地址（10分钟）**3.1 帧结构****内容要点：**

- 帧首部：帧定界、同步
- 地址：MAC地址（48位）
- 数据：上层交付的数据
- FCS：帧校验序列

3.2 MAC地址**内容要点：**

- 48位（6字节），通常写成12位十六进制
- 格式：XX:XX:XX:XX:XX:XX
- 前24位：厂商标识（OUI）
- 后24位：设备标识
- 全球唯一

教学建议：

- 展示真实的MAC地址示例
 - 让学生查看自己手机/电脑的MAC地址
-

四、IEEE 802参考模型（10分钟）

4.1 LLC与MAC子层

内容要点：



- LLC子层：向上提供统一接口，屏蔽不同MAC的差异
- MAC子层：解决多个节点如何共享信道的问题

4.2 为什么需要MAC？

内容要点：

- 无线信道是共享的广播信道
 - 多个节点同时发送会产生冲突
 - 需要协调机制——这就是MAC协议
-

五、差错控制（5分钟）

5.1 差错控制方法

内容要点：

方法	原理	特点
CRC	循环冗余校验	检错能力强
FEC	前向纠错	可以纠错
ARQ	自动重传请求	确认+重传

衔接语：

"了解了数据链路层的基本功能，接下来我们重点学习MAC协议——如何让多个节点公平、高效地共享无线信道。"

六、本课时小结 (5分钟)

知识点回顾

1. 数据链路层位于物理层之上，以帧为单位传输
2. 五大功能：封装成帧、透明传输、差错控制、流量控制、链路管理
3. MAC地址：48位，全球唯一
4. IEEE 802模型将数据链路层分为LLC和MAC两个子层
5. MAC子层解决信道共享问题

第2课时：2.3.2 MAC协议分类与静态协议 (50分钟)

一、MAC协议发展历史 (10分钟)

1.1 ALOHA协议

内容要点：

- 1968年，夏威夷大学Norman Abramson
- 最早的无线计算机通信网络
- 纯ALOHA：想发就发，碰撞则重传
- 时隙ALOHA：只能在时隙开始时发送

意义：

- 开创了随机接入的先河
- 是所有现代MAC协议的鼻祖

1.2 发展脉络

内容要点：



二、MAC协议分类 (15分钟)

2.1 分类方法一：静态 vs 动态

内容要点：

类型	特点	代表协议
静态MAC	预先分配资源，无冲突	TDMA, FDMA, CDMA
动态MAC	按需竞争资源，可能冲突	CSMA/CD, CSMA/CA

2.2 分类方法二：基于竞争 vs 基于调度

内容要点：

类型	原理	优点	缺点
基于竞争	节点竞争信道	灵活，适应性强	可能冲突
基于调度	预先分配时隙/频率	无冲突	不够灵活

2.3 WSN MAC协议分类

内容要点：



三、静态MAC协议（20分钟）

3.1 TDMA（时分多址）

内容要点：

时间轴：
|---节点A---|---节点B---|---节点C---|---节点A---|---节点B---|---节点C---|
|<----- 一个周期 ----->|

特点：

- 每个节点分配固定时隙

- 只在自己的时隙内发送
- 无碰撞

优点：无冲突、可预测延迟、节能（非时隙可休眠） **缺点：**需要同步、时隙固定不灵活、空闲时隙浪费

3.2 FDMA（频分多址）

内容要点：

频率轴：



特点：

- 每个节点分配不同频率
- 同时发送，互不干扰

优点：简单、无碰撞 **缺点：**频谱利用率低、需要保护间隔

3.3 CDMA（码分多址）

内容要点：

- 回顾2.2节的扩频通信
- 每个节点使用不同的扩频码
- 所有节点可以同时在同一频率发送
- 接收端通过码字区分不同发送者

优点：频谱效率高、抗干扰 **缺点：**实现复杂、远近效应

3.4 静态协议对比

内容要点：

协议	分配资源	优点	缺点	WSN适用性
TDMA	时间	无冲突	需同步	高
FDMA	频率	简单	浪费频谱	低
CDMA	码字	效率高	复杂	中

四、本课时小结（5分钟）

知识点回顾

1. ALOHA是MAC协议的鼻祖（1968年）
2. MAC协议分类：静态/动态、竞争/调度
3. TDMA：时分复用，每个节点固定时隙
4. FDMA：频分复用，每个节点固定频率
5. CDMA：码分复用，用扩频码区分

衔接语

"静态MAC协议虽然无冲突，但不够灵活。下节课我们学习动态MAC协议——CSMA，看看它是如何让节点'先听后发'的。"

第二节课（100分钟）：CSMA/CD与CSMA/CA协议

第3课时：2.3.3 CSMA/CD协议（50分钟）

一、课前回顾与引入（5分钟）

回顾要点

- MAC协议分类：静态vs动态
- 静态MAC（TDMA/FDMA/CDMA）：预分配，无冲突
- 动态MAC：按需竞争，更灵活

引入问题

"静态MAC需要预先分配资源，不够灵活。有没有一种协议，让节点自己判断什么时候可以发送？这就是CSMA——先听后发。"

二、CSMA基本原理（10分钟）

2.1 CSMA定义

内容要点：

- CSMA = Carrier Sense Multiple Access
- 载波侦听多路访问
- 核心思想：先听后发

2.2 CSMA工作流程

内容要点：

发送数据前：

1. 倾听信道
2. 如果信道空闲 → 发送数据
3. 如果信道忙 → 等待

类比：

想说话前先听听别人有没有在说

2.3 CSMA的三种策略

内容要点：

策略	信道忙时	特点
1-坚持	持续侦听，空闲立即发	冲突概率高
非坚持	随机等待后重试	信道利用率低
p-坚持	以概率p发送	折中方案

三、CSMA/CD协议详解（15分钟）

3.1 CSMA/CD定义

内容要点：

- CSMA/CD = CSMA with Collision Detection
- 带碰撞检测的载波侦听多路访问
- 用于有线以太网（IEEE 802.3）

3.2 CSMA/CD三大特征

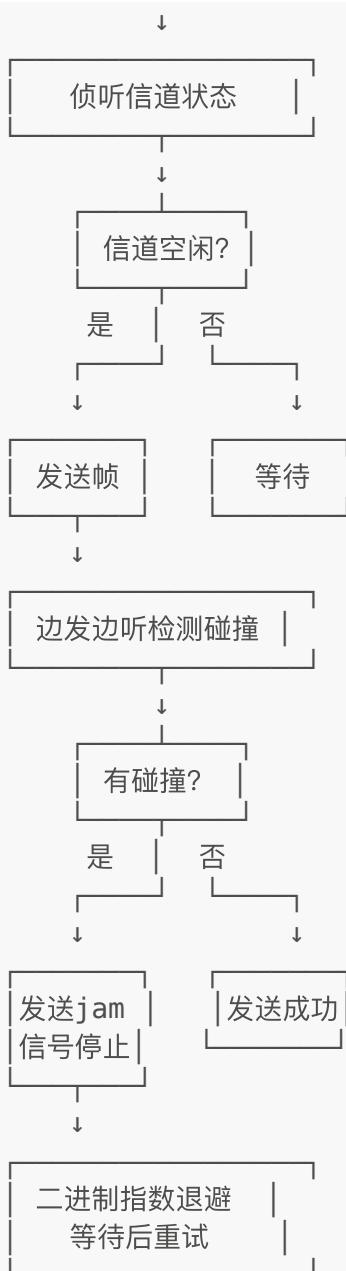
内容要点：

特征	含义	作用
先听后发	发送前侦听信道	避免明显冲突
边听边发	发送时继续侦听	检测碰撞
碰撞停止	检测到碰撞立即停止	减少信道浪费

3.3 CSMA/CD工作流程

内容要点：

准备发送数据



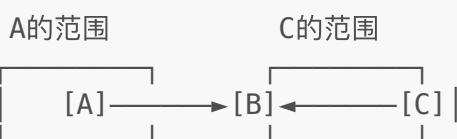
四、CSMA/CD的局限性 (15分钟) ★★

4.1 隐蔽站问题 (Hidden Terminal)

内容要点：

场景设置：

- A和C都在B的通信范围内
- A和C互相听不到对方



问题发生：

1. A开始发送数据给B
2. C侦听信道 → 检测为空闲（听不到A）
3. C开始发送数据给B
4. B处发生碰撞！

结论：C对A来说是“隐蔽站”

教学建议：

- 画图演示三个节点的位置关系
- 强调“听不到≠没有在发送”

4.2 暴露站问题（Exposed Terminal）

内容要点：

场景设置：

- B正在发送数据给A
- C想发送数据给D
- C能听到B的发送



问题发生：

1. B正在发送给A
2. C侦听信道 → 检测为忙（听到B）
3. C推迟发送给D
4. 但实际上：C发给D不会干扰B发给A！

结论：B对C来说造成了“暴露”问题

C不必要的推迟了发送

教学建议：

- 强调暴露站问题导致信道利用率降低
- 与隐蔽站问题形成对比

4.3 为什么CSMA/CD不适合无线网络？

内容要点：

问题	原因
碰撞检测困难	无线信号衰减快，发送时难以检测弱碰撞信号
隐蔽站问题	无线传播范围有限，存在听不到的区域
暴露站问题	导致不必要的等待，降低效率

问题	原因
半双工限制	无线设备通常不能同时收发

衔接语：

"CSMA/CD在无线网络中存在这些问题，该怎么解决？这就是CSMA/CA——碰撞避免而不是碰撞检测。"

五、本课时小结（5分钟）

知识点回顾

1. CSMA核心思想：先听后发
2. CSMA/CD三大特征：先听后发、边听边发、碰撞停止
3. 隐蔽站问题：听不到不代表没有发送 ★
4. 暴露站问题：听得到不代表会干扰 ★
5. CSMA/CD不适合无线网络

第4课时：2.3.4 CSMA/CA协议（50分钟）

一、CSMA/CA概述（5分钟）

1.1 定义

内容要点：

- CSMA/CA = CSMA with Collision Avoidance
- 带碰撞避免的载波侦听多路访问
- 用于无线网络（IEEE 802.11 WiFi）

1.2 设计思想

内容要点：

- 无线网络难以检测碰撞 → 改为避免碰撞
- 通过预约机制减少碰撞概率
- 即使信道空闲也要随机等待

二、CSMA/CD vs CSMA/CA（5分钟）

内容要点：

特性	CSMA/CD	CSMA/CA
碰撞处理	检测	避免
应用场景	有线以太网	无线网络
ACK确认	无	有

特性	CSMA/CD	CSMA/CA
信道空闲时	立即发送	随机等待后发送
隐蔽站解决	无	RTS/CTS

三、帧间间隔 (10分钟)

3.1 IFS定义

内容要点：

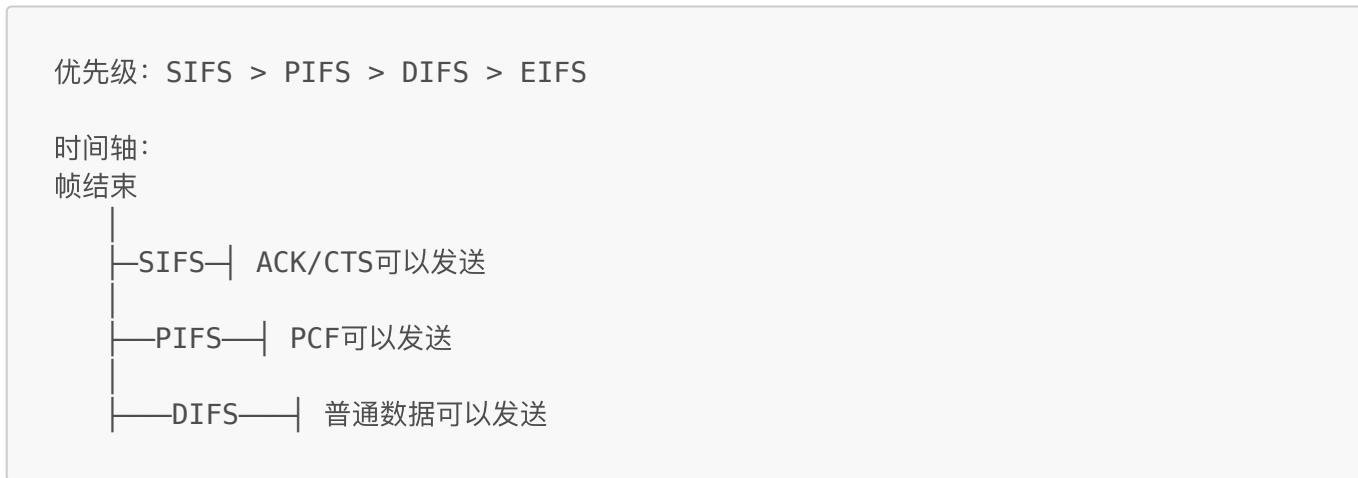
- IFS = Inter-Frame Space, 帧间间隔
- 不同类型的帧有不同的优先级
- 优先级通过IFS长度体现

3.2 四种IFS

内容要点：

IFS类型	全称	长度	用途
SIFS	Short IFS	最短	ACK、CTS (最高优先级)
PIFS	PCF IFS	中等	点协调功能
DIFS	DCF IFS	较长	普通数据帧
EIFS	Extended IFS	最长	错误恢复

时序图：



四、RTS/CTS握手机制 (15分钟) ★★

4.1 基本原理

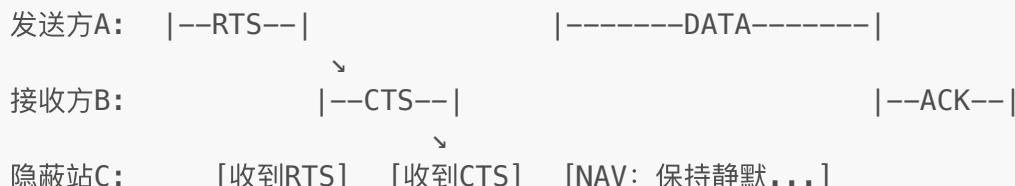
内容要点：

- RTS = Request To Send (请求发送)
- CTS = Clear To Send (清除发送/允许发送)
- 通过预约信道来避免冲突

4.2 完整流程

内容要点：

时序图：



详细步骤：

1. A想发送数据给B
2. A先发送RTS帧，包含：源地址、目的地址、传输时长
3. B收到RTS后，回复CTS帧
4. A收到CTS后，发送DATA帧
5. B收到DATA后，回复ACK帧

4.3 如何解决隐蔽站问题

内容要点：

场景：A发送给B，C是隐蔽站



解决过程：

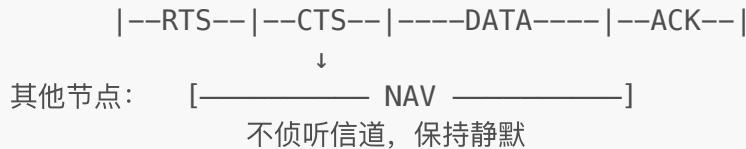
1. A发送RTS → B收到
2. B回复CTS → C也能收到CTS！
3. C虽然听不到A，但能听到B的CTS
4. C知道有人要占用信道，设置NAV等待
5. 冲突避免！

4.4 NAV机制

内容要点：

- NAV = Network Allocation Vector, 网络分配向量
- 虚拟载波侦听
- 节点收到RTS/CTS后，从中读取传输时长
- 设置NAV计时器，在此期间认为信道忙

NAV机制示意：



五、二进制指数退避算法（10分钟）

5.1 基本原理

内容要点：

- 信道空闲时不立即发送，随机等待
- 碰撞后，退避窗口指数增长
- 减少再次碰撞的概率

5.2 算法步骤

内容要点：

1. 初始竞争窗口： $CW = CW_{min}$ (如15)
2. 随机选择退避时间： $backoff = \text{rand}(0, CW) \times \text{时隙时间}$
3. 等待退避时间后发送
4. 若发生碰撞： $CW = \min(2 \times CW, CW_{max})$
5. 若发送成功： $CW = CW_{min}$

示例 ($CW_{min}=15, CW_{max}=1023$) :

- 初始： $CW=15$, 退避时间在0–15时隙之间随机
- 第1次碰撞： $CW=31$
- 第2次碰撞： $CW=63$
- 第3次碰撞： $CW=127$
- ...
- 最大： $CW=1023$

5.3 为什么要指数增长？

内容要点：

- 碰撞说明竞争激烈
- 增大退避窗口，分散重传时间
- 减少再次碰撞的概率

六、本课时小结（5分钟）

知识点回顾

1. CSMA/CA：碰撞避免，用于无线网络
2. 帧间间隔：SIFS < PIFS < DIFS，优先级控制
3. RTS/CTS机制：预约信道，解决隐蔽站问题 ★
4. NAV：虚拟载波侦听，避免不必要的侦听
5. 二进制指数退避：碰撞后窗口翻倍

衔接语

"CSMA/CA解决了无线网络的信道访问问题，但它是为WiFi设计的，功耗较高。WSN需要更省电的MAC协议，这就是下节课要学习的S-MAC、T-MAC等。"

第三节课（100分钟）：WSN专用MAC协议与总结

第5课时：2.3.5 WSN专用MAC协议（50分钟）

一、WSN对MAC的特殊需求（5分钟）

1.1 回顾WSN特点

内容要点：

- 能量受限：电池供电，难以更换
- 通信特点：低数据率、事件驱动
- 网络特点：节点密集、多跳传输

1.2 传统MAC的问题

内容要点：

- 空闲侦听：信道没有数据也要持续侦听，浪费能量
- 碰撞重传：浪费能量
- 串扰：收到不是给自己的数据，浪费能量
- 控制开销：RTS/CTS等控制帧消耗能量

引出问题：

"如何设计一个更省电的MAC协议？核心思想是——不需要的时候就睡觉！"

二、S-MAC协议（15分钟）★★

2.1 设计动机

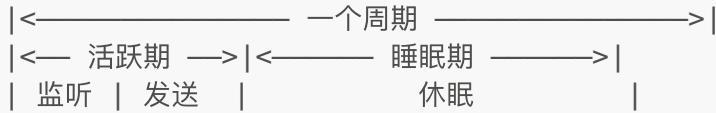
内容要点：

- 减少空闲侦听
- 核心思想：周期性睡眠

2.2 周期性睡眠机制

内容要点：

S-MAC工作周期：



$$\text{占空比} = \text{活跃期} / \text{周期} = 5\% \sim 20\%$$

示例：

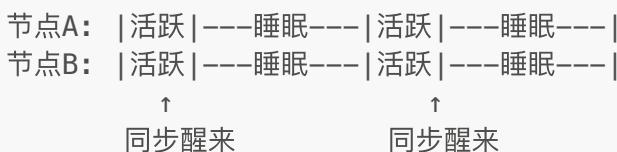
- 周期 = 1秒
- 占空比 = 10%
- 活跃期 = 100ms
- 睡眠期 = 900ms
- 节省90%的侦听能量！

2.3 同步机制

内容要点：

- 邻居节点需要同步：同时醒来才能通信
- 使用SYNC帧进行同步
- 新加入节点跟随已有调度

节点同步：



2.4 消息传递

内容要点：

- 长消息分片传输
- 突发传输模式：一次活跃期传输多个分片
- 避免每个分片都等一个周期

2.5 S-MAC优缺点

内容要点：

优点	缺点
----	----

优点	缺点
大幅降低空闲侦听能耗	延迟增加（要等活跃期）
实现简单	固定占空比，不够灵活
节点自组织同步	边界节点需维护多个调度

三、T-MAC协议（12分钟）★★

3.1 设计动机

内容要点：

- S-MAC问题：固定活跃期
- 流量低时：活跃期大部分时间空闲，浪费能量
- 流量高时：活跃期可能不够用

3.2 自适应活跃期

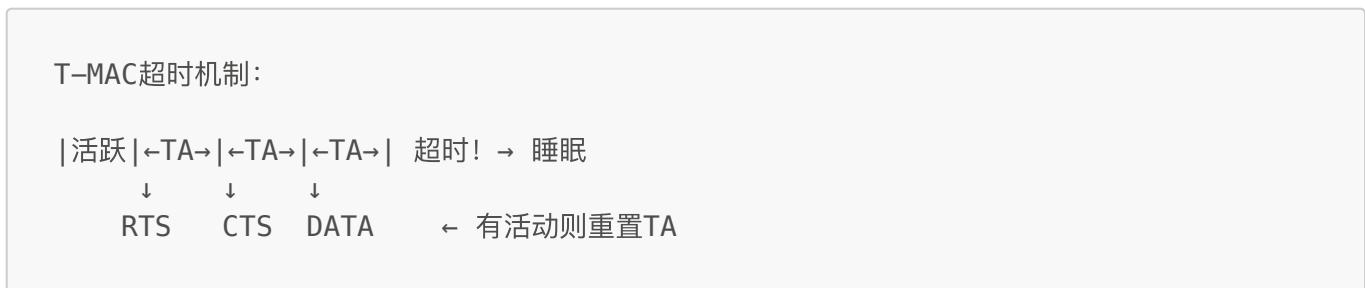
内容要点：



3.3 超时机制

内容要点：

- 定义超时时间TA
- 如果TA时间内没有活动（无数据收发），提前进入睡眠
- TA的选择：至少能完成一次RTS/CTS交换



3.4 早睡问题

内容要点：

问题场景：

- A发送给B，B转发给C
- A发完后B处理，C可能在等待时超时睡眠

解决方法：

- FRTS (Future RTS)：提前通知下一跳
- DS (更多数据) 位：表示还有后续数据

3.5 T-MAC优缺点**内容要点：**

优点	缺点
自适应活跃期，更节能	实现较复杂
适应流量变化	早睡问题需要额外机制
兼容S-MAC	同步开销与S-MAC相同

四、Z-MAC协议（8分钟）**4.1 设计思想****内容要点：**

- 结合TDMA（无冲突）和CSMA（灵活性）
- 低竞争时：类似CSMA
- 高竞争时：类似TDMA

4.2 双模式工作**内容要点：**

Z-MAC双模式：

低竞争级别 (LCL)：

- 任何节点可在任何时隙尝试发送
- 时隙“拥有者”有优先权
- 竞争后发送

高竞争级别 (HCL)：

- 只有时隙拥有者可在该时隙发送
- 避免冲突

4.3 Z-MAC特点

内容要点：

特点	说明
自适应	根据竞争程度切换模式
高效	低负载时像CSMA灵活，高负载时像TDMA无冲突
复杂	需要时隙分配、模式切换机制

五、其他WSN MAC协议简介（5分钟）

5.1 SIFT协议

内容要点：

- 用于事件驱动型WSN
- 固定竞争窗口
- 根据竞争节点数调整发送概率
- 适合多个节点同时检测到事件的场景

5.2 TRAMA协议

内容要点：

- 流量自适应的TDMA
- 根据流量动态分配时隙
- 无冲突，适合稳定流量

六、本课时小结（5分钟）

知识点回顾

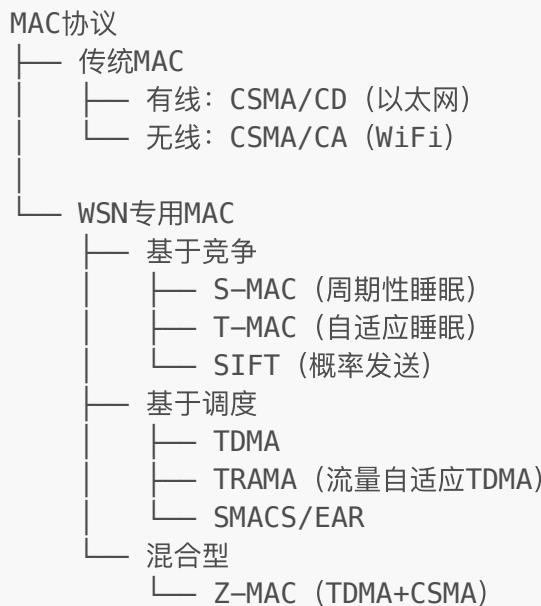
1. WSN MAC面临的能量挑战
2. S-MAC：周期性睡眠，占空比5%-20% ★
3. T-MAC：自适应活跃期，超时提前睡眠 ★
4. Z-MAC：TDMA+CSMA混合，自适应切换
5. 不同协议适用不同场景

第6课时：2.3.6 总结与协议对比（50分钟）

一、MAC协议分类总结（10分钟）

1.1 分类框架

内容要点：



1.2 从CSMA/CD到WSN MAC的演进

内容要点：

- CSMA/CD (有线)
 - ↓ 无法检测碰撞
- CSMA/CA (无线WiFi)
 - ↓ 能耗太高
- S-MAC (WSN)
 - ↓ 固定占空比不灵活
- T-MAC (WSN)
 - ↓ 还可以更高效
- Z-MAC (WSN)

二、协议性能对比 (10分钟)

2.1 性能对比表

内容要点：

协议	能效	延迟	吞吐量	复杂度	适用场景
CSMA/CA	低	低	高	中	WiFi
S-MAC	高	高	低	低	低流量WSN
T-MAC	高	中	中	中	变化流量
Z-MAC	中	低	高	高	高流量
TDMA	高	固定	固定	低	规则流量

2.2 如何选择MAC协议?

内容要点:

应用场景	推荐协议	原因
环境监测 (低流量)	S-MAC	简单、省电
工业监控 (变化流量)	T-MAC	自适应
事件检测 (突发流量)	Z-MAC	高吞吐量
周期采集 (规则流量)	TDMA	无冲突
实时监控 (低延迟)	CSMA/CA	延迟低

三、重点知识回顾 (10分钟)

3.1 本章核心问题

内容要点:

问题1: 多个节点如何共享信道?

答案: MAC协议

问题2: CSMA/CD为什么不适合无线?

答案: 无法检测碰撞、隐蔽站、暴露站问题

问题3: CSMA/CA如何避免碰撞?

答案: RTS/CTS预约、NAV虚拟侦听

问题4: WSN MAC如何省电?

答案: 周期性睡眠 (S-MAC) 、自适应睡眠 (T-MAC)

3.2 必须掌握的概念

内容要点:

1. 隐蔽站问题: 听不到不代表没有发送
2. 暴露站问题: 听得到不代表会干扰
3. **RTS/CTS**: 预约信道, 解决隐蔽站
4. **NAV**: 虚拟载波侦听
5. 占空比: 活跃期/周期, S-MAC约5%-20%
6. 超时机制: T-MAC的自适应关键

四、知识框架总结 (5分钟)

内容要点:

2.3 MAC层技术介绍

- 2.3.1 数据链路层概述
 - 五大功能
 - 帧结构与MAC地址
 - IEEE 802模型
- 2.3.2 MAC协议分类
 - 静态vs动态
 - TDMA/FDMA/CDMA
 - ALOHA发展历史
- 2.3.3 CSMA/CD
 - 先听后发、边听边发、碰撞停止
 - 隐蔽站问题 ★
 - 暴露站问题 ★
- 2.3.4 CSMA/CA
 - 帧间间隔 (SIFS/DIFS)
 - RTS/CTS机制 ★
 - NAV虚拟侦听
 - 二进制指数退避
- 2.3.5 WSN专用MAC
 - S-MAC: 周期性睡眠 ★
 - T-MAC: 自适应活跃期 ★
 - Z-MAC: 混合调度
- 2.3.6 总结与对比
 - 协议选择指南

五、随堂练习 (10分钟)

(见单独的练习题文档)

六、衔接下一章 (5分钟)

知识衔接

内容要点：

"这一章我们学习了数据链路层，解决了'如何在多个节点间公平高效地共享信道'的问题。

下一章我们将学习网络层，解决'如何将数据从源节点路由到目的节点'的问题。

物理层负责传输比特，数据链路层负责传输帧，网络层负责传输数据包——它们层层配合，共同完成通信任务。"

预习建议

- 回顾图论基础（最短路径）
- 了解WSN路由的特殊挑战