

## 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

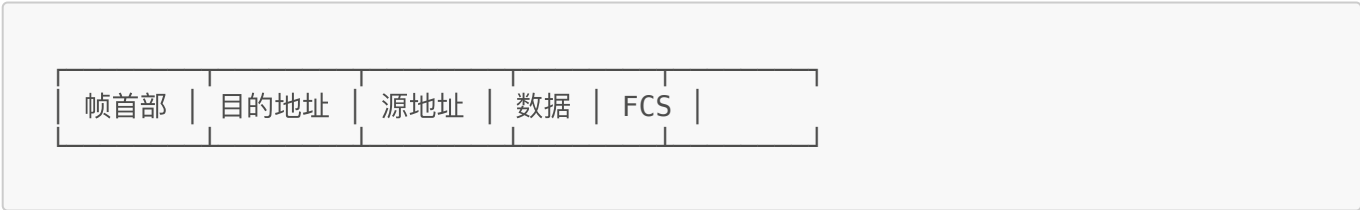
内容要点（五大功能）：

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

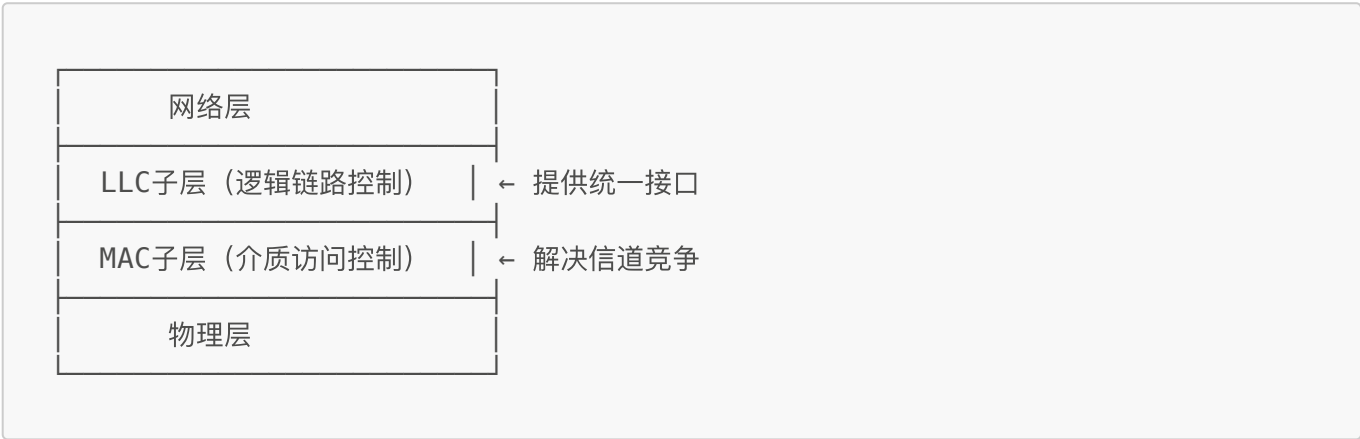
教学建议：

- 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

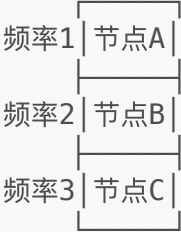
- 只在自己的时隙内发送
- 无碰撞

**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. 侦听信道
- 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：

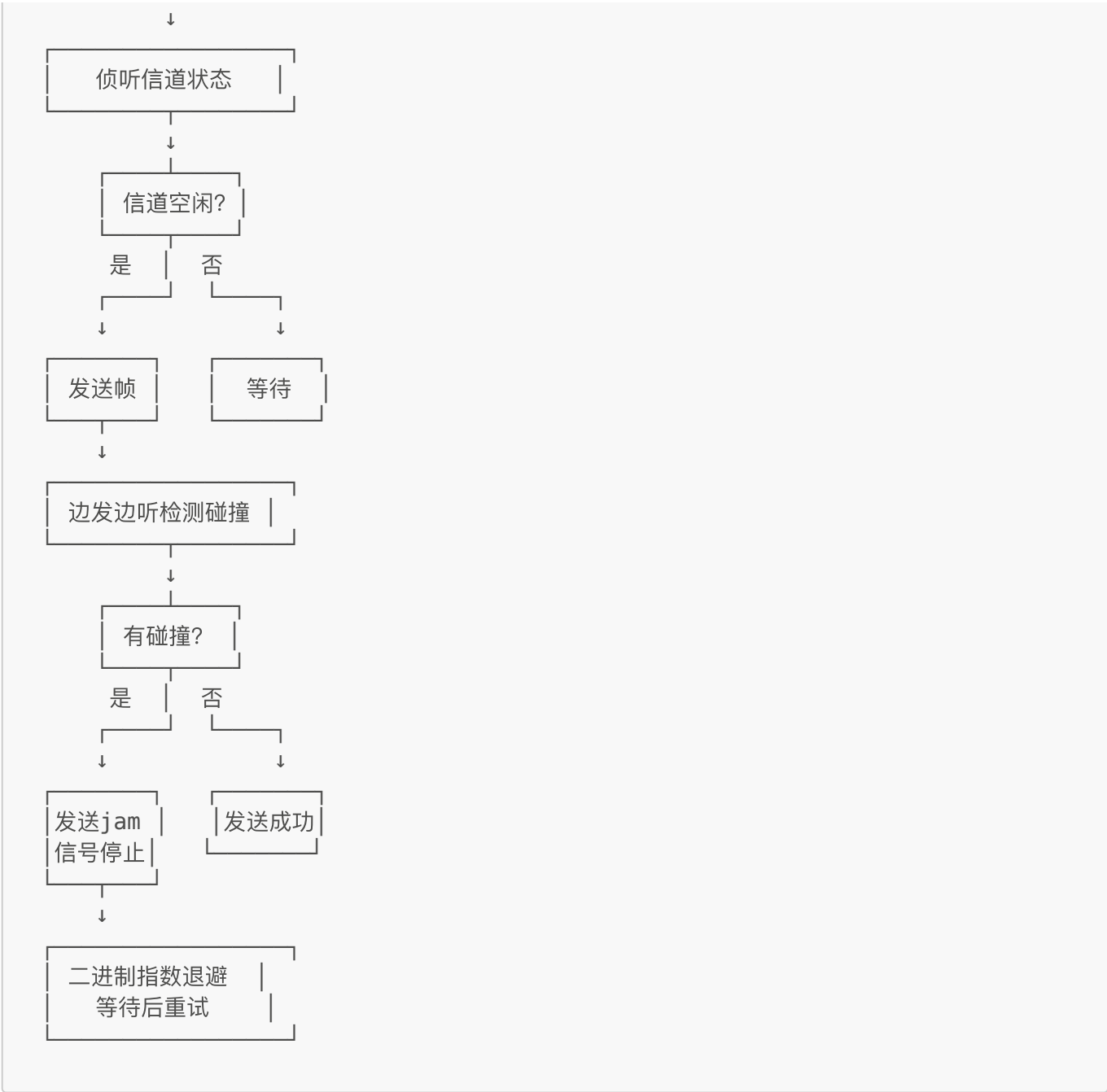
特征	含义	作用
先听后发	发送前侦听信道	避免明显冲突
边听边发	发送时继续侦听	检测碰撞
碰撞停止	检测到碰撞立即停止	减少信道浪费

3.3 CSMA/CD工作流程

内容要点：

准备发送数据

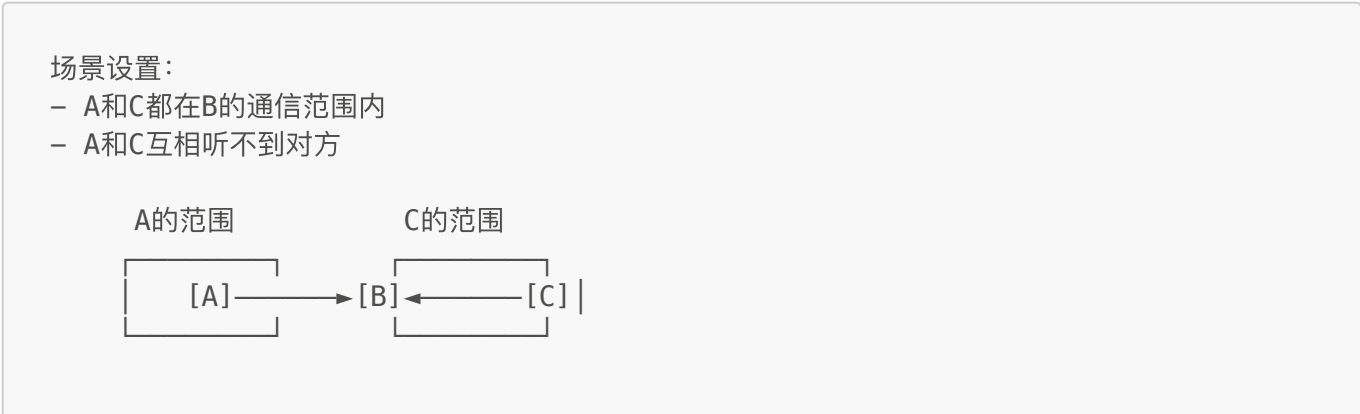




四、CSMA/CD的局限性（15分钟）★★

4.1 隐蔽站问题 (Hidden Terminal)

内容要点：



- 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不必要地推迟了发送

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

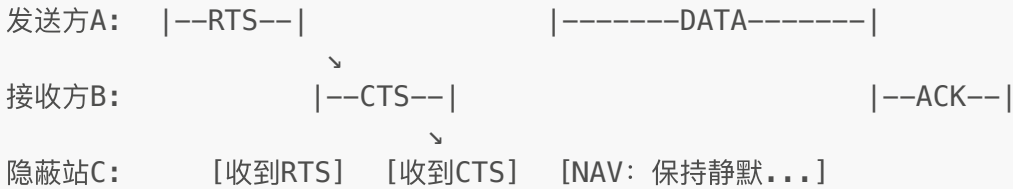
内容要点：

- 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：



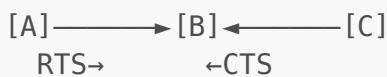
详细步骤：

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：

|--RTS--|--CTS--|----DATA----|--ACK--|

↓

其他节点： [----- NAV -----]  
不侦听信道，保持静默

## 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：  $backoff = rand(0, CW) \times \text{时隙时间}$
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：

|<———— 一个周期 ————>|

|<— 活跃期 —>|<———— 睡眠期 ————>|

| 监听 | 发送 |                      休眠                      |

占空比 = 活跃期 / 周期 = 5% ~ 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：

节点A：|活跃|---睡眠---|活跃|---睡眠---|

节点B：|活跃|---睡眠---|活跃|---睡眠---|

↑                                  ↑

同步醒来                          同步醒来

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：

S-MAC vs T-MAC:

S-MAC: |——固定活跃期——|——睡眠期——|  
          |  有用  |  空闲浪费  |

T-MAC: |—自适应活跃期—|——更长的睡眠期——|  
          |  有用  |  
                  ↑  
              超时后提前睡眠

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

T-MAC超时机制：

| 活跃 | ←TA→ | ←TA→ | ←TA→ | 超时! → 睡眠  
      ↓      ↓      ↓  
      RTS   CTS   DATA   ← 有活动则重置TA

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）

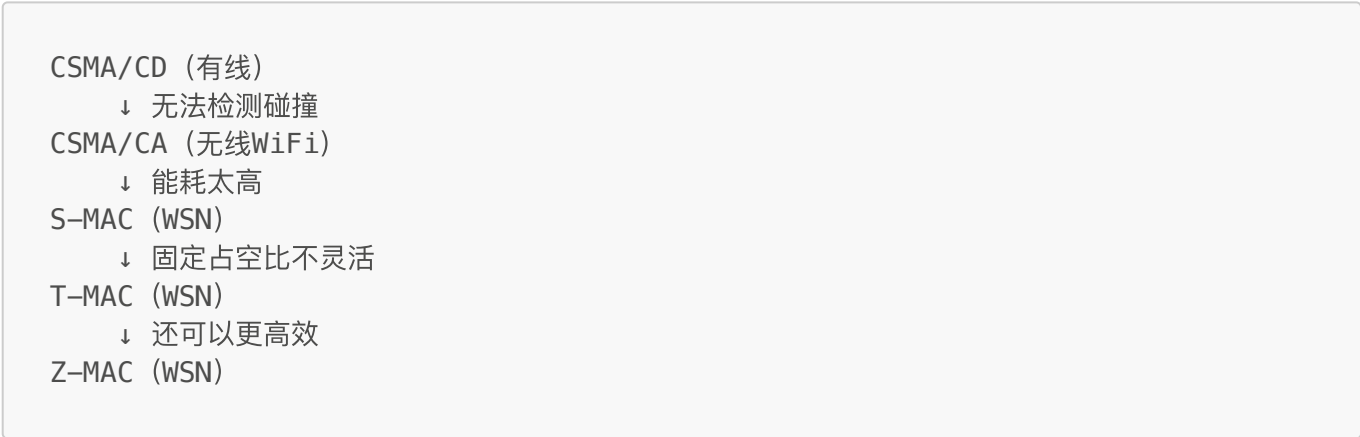
1.1 分类框架

内容要点：



1.2 从CSMA/CD到WSN MAC的演进

内容要点：



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