

#8-MAC协议

- 概述

- 介质访问控制（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。
- MAC协议处于传感器网络协议的**底层部分**,对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。
- 传感器节点资源能量、存储、计算和通信受限，**单个节点功能较弱**，传感器网络功能由众多节点协作实现。
- 多点通信需要MAC协议协调无线信道分配，在网络范围内需要路由协议选择通信路径。
- 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：

- 节省能量。
 - 满足应用要求下，尽量节省使用节点能量。
- 可扩展性。
 - 适应动态变化的网络拓扑。
- 网络效率。
 - 网络的效率包括网络的公平性、实时性、网络吞吐容量以及带宽利用率。

- 传感器节点无线通信模块的状态包括**发送状态、接收状态、侦听状态和睡眠状态**等。无线通信模块在**发送状态**消耗的**能量最多**，在**睡眠状态**消耗**能量最少**，接收状态和侦听状态下的能量消耗略小于发送状态。

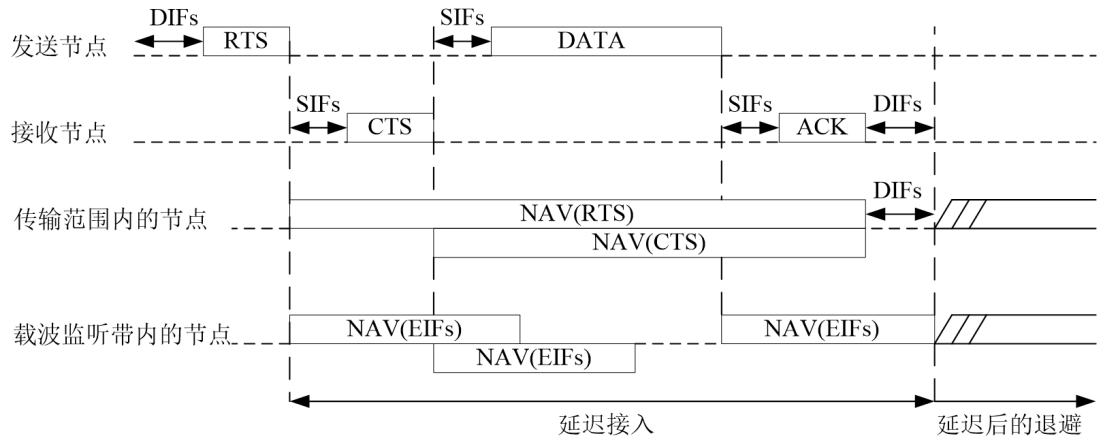
基于上述原因，传感器网络MAC协议为了减少能量的消耗，通常采用“**侦听/睡眠**”交替的无线信道使用策略。

为使节点睡眠时不错过发给它的数据，或减少节点的过度侦听，邻居节点间需要协调侦听和睡眠的周期。

- 重要性依次递减：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。
- 目前传感器网络MAC协议还缺乏一个统一的分类方式，主要**三种分类方式**：
 - 采用分布式控制还是集中式控制
 - 使用单一信道还是多个信道
 - 采用固定分配信道还是随机访问信道方式
- 按照**采用固定分配信道还是随机访问信道方式**，传感器网络MAC协议可以分为三类：
 - 采用时分复用方式
 - 采用无线信道随机竞争方式
 - 其他MAC协议（频分复用、码分复用等）

- 基于竞争的MAC协议

- **基本思想**:当节点需要发送数据时，通过竞争方式使用无线信道，如果发送的数据产生了碰撞，就按照某种策略重发数据，直到数据发送成功或放弃发送。
- 典型的基于竞争的MAC协议是**载波侦听多路访问(carrier sense multiple access,CSMA)**。
- IEEE802.11 MAC层协议
 - 分布式协调DCF：节点侦听到无线信道忙后，采用CSMA/CA机制和随机退避时间，实现无线信道的共享。所有定向通信都采用立即的主动确认ACK帧机制；如果没有收到ACK，则发送方会重传数据
 - 点协调式：基于优先级的无竞争访问，是一种可选的控制方式。它通过访问接入点协调节点的数据收发，通过轮询方式查询当前哪些节点有数据发送的请求，并在必要时给予数据发送权。



图中：RTS: request-to-send, CTS: clear-to-send NAV: network allocation vector（两帧中都有一个字段表示这次数据交换需要的时间长度），它可以看作是一个计数器，以均匀速率递减计数到零。当计数器为零时，虚拟载波侦听指示信道为空闲状态；否则信道为忙。

IEEE802.11 MAC协议提供了三种基本帧间间隔(IFS)，用来提供访问无线信道的优先级。

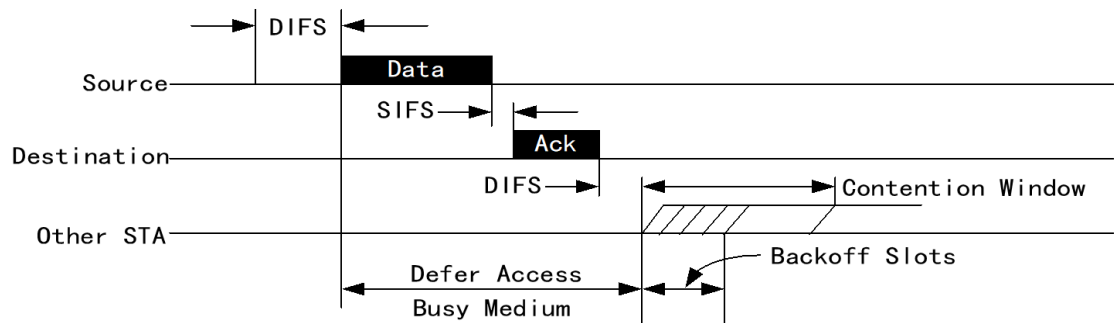
SIFS:最短帧间间隔。使用SIFS的帧优先级最高，用于需要立即响应的服务，如ACK，CTS和控制帧。

PIFS:PCF方式下节点使用的帧间间隔，用以获得在无竞争访问周期启动时访问信道的优先级。

DIFS：DCF方式下节点使用的帧间间隔，用以发送数据帧和管理帧。

◦ CSMA/CA协议

- 当一个节点要传输一个分组时，它首先侦听信道状态。如果信道空闲，而且**经过一个帧间间隔时间DIFS**，信道仍为空闲，则站点立即开始发送信息。如果信道忙，则站点一直侦听信道直到信道的空闲时间超过DIFS。
- 802.11 MAC协议中通过**立即主动确认机制和预留机制**来提高性能。



在**主动确认机制**中，当目标节点收到一个发给它的有效数据帧时，必须向源节点发送一个应答帧，确认数据已被正确接收到。主动确认机制只能用于有明确目标地址的帧，不能用于组播报文和广播报文传输。

预留机制要求源节点和目标节点在发送数据帧之前交换简短的控制帧，即发送请求帧（RTS）和清除帧（CTS）。从RTS（或CTS）帧开始到ACK帧结束的这段时间，信道将一直被这次数据交换过程占用。RTS和CTS帧中包含有关于这段时间长度的信息。每个站点维护一个定时器，记录网络分配向量NAV，指示信道被占用的剩余时间

◦ S-MAC协议：在802.11MAC协议基础上，针对传感器网络的节省能量需求而提出的传感器网络MAC协议。

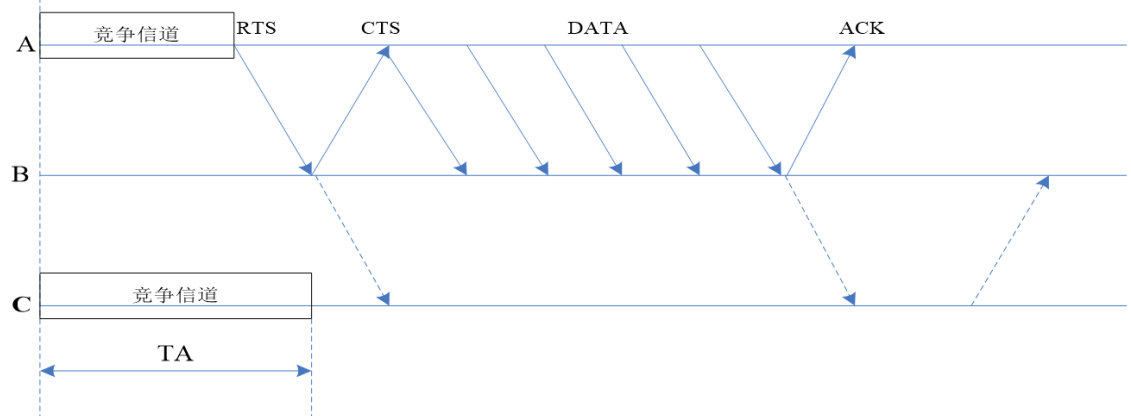
- S-MAC协议假设通常情况下传感器网络的**数据传输量少、节点协作完成共同的任务**，网络内部能够进行**数据的处理和融合**以减少数据通信量，网络能够容忍一定程度的**通信延迟**。它的主要设计目标是提供良好的**扩展性**，减少节点**能量的消耗**。
- 针对碰撞重传、串音、空闲侦听和控制消息等可能造成传感器网络消耗更多能量的主要因素，S-MAC协议采用以下机制：

- 周期性侦听/睡眠的低占空比工作方式，控制节点尽可能处于睡眠状态来降低节点能量的消耗；
- 邻居节点通过协商的一致性睡眠调度机制形成虚拟簇，减少节点的空闲侦听时间；
- 通过流量自适应的侦听机制，减少消息在网络中的传输延迟；
- 采用带内信令来减少重传和避免监听不必要的数据；
- 通过消息分割和突发传递机制来减少控制消息的开销和消息的传递延迟。
- 周期性侦听/睡眠
 - 为了减少能量消耗,节点尽量处于低功耗的睡眠状态。
 - 节点独立调度其工作状态,周期性转入睡眠,苏醒后侦听信道状态,判断是否需要发送或接收数据。
 - 邻居节点应维持调度周期通告，便于相互通信。
 - 每个节点使用SYNC消息通过自己的调度消息，同时维护一个调度表，保存所有相邻节点的调度消息。
 - 具有相同调度的节点形成一个虚拟簇。每个节点定期广播自己的调度，使新加入的节点与已有的节点保持同步。
- 流量自适应侦听
 - 传感器网络采用多跳通信,节点的周期性睡眠导致通信延迟增加。采用流量自适应侦听可以减少通信延迟的累加效应。
 - 在一次通信中通信节点的邻居节点在通信结束后不立即进入睡眠状态，而保持一段侦听时间。如果节点在这段时间收到RTS分组，就可以立即接收数据，无须等待下一次调度侦听时间，减少数据分组延迟。如果在这段时间没有收到RTS分组，则转入下一次调度侦听周期。
- 串音避免
 - S-MAC协议采用虚拟载波和物理载波侦听机制，以及RTS/CTS的通告机制。
 - 与802.11MAC 协议不同的是邻居节点通信过程中，S-MAC节点处于睡眠状态。
- 消息传递
 - S-MAC协议采用RTS/CTS机制，一次预约发送整个长消息时间。
 - 将长消息分割成几个短消息在预约时间内突发传送，目的节点对每个短消息都要发一个应答消息，否则发送节点重传该消息。
 - S-MAC协议的RTS/CTS 控制消息和数据消息携带的时间是整个长消息传输的剩余时间，而802.11MAC 协议的RTS/CTS只预约下一个发送短消息的时间。
 - 小结
 - **S-MAC协议比IEEE 802.11协议具有更高的能量效率、更强的可扩展性，能够更好地适应网络拓扑结构的变化**
 - 但由于采用固定的休眠占空比，信道的带宽利用率受到一定影响，且传输延迟较大。
 - 此外，协议实现比较复杂，需要占用较大的存储空间。
 - S-MAC协议最主要的缺点是较大的传输延迟，因为它是以牺牲延迟换取能量节省的。
- T-MAC协议：在S-MAC协议的基础上提出。
 - **传感器网络MAC协议最重要的设计目标是减少能量消耗**，在空闲侦听、碰撞、协议开销和串音等浪费能量的因素中，空闲侦听的能量消耗占绝对大的比例，特别是在消息传输频率较低的情况下。
 - S-MAC协议通过采用周期性侦听/睡眠工作方式来减少空闲侦听，**周期长度固定不变，节点的侦听活动时间也是固定。**

- **T-MAC协议**中，发送数据时仍为RTS/CTS/DATA/ACK的通信过程，节点周期性唤醒进行侦听，如果在一个给定时间TA(time active)内没有发生下面任何一个激活事件，则活动结束。
 - 周期时间定时器溢出
 - 在无线信道上收到数据
 - 通过接收信号强度指示RSSI感知存在无线通信
 - 通过侦听RTS/CTS分组，确认邻居的数据交换已经结束。
- 在每个活动期间开始，T-MAC协议按照**突发方式**发送所有数据。TA决定每个周期最小的空闲侦听时间，它的取值对于T-MAC协议性能至关重要

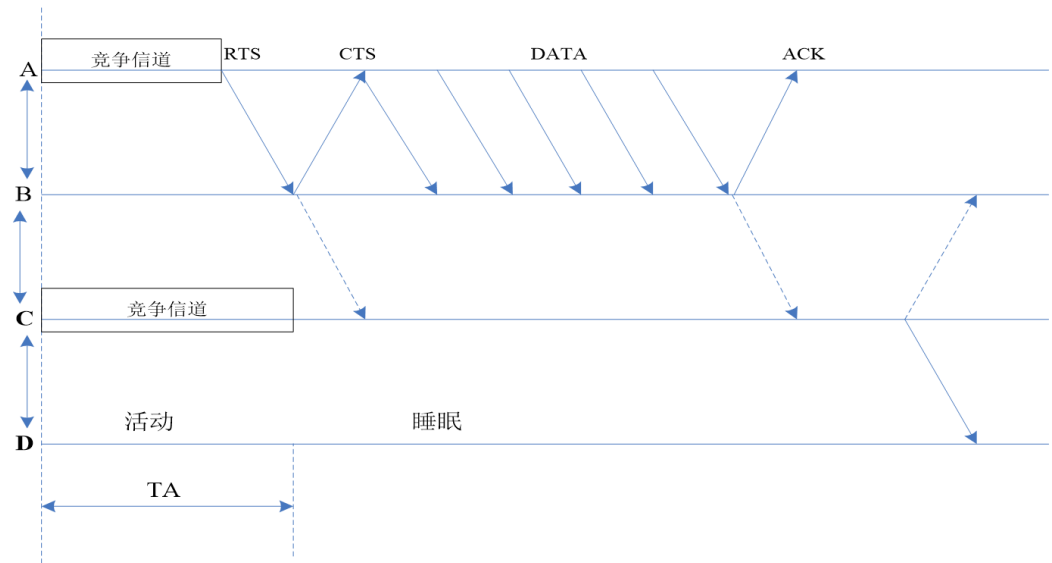
$$TA > C + R + T$$

其中，C为竞争信道时间，R为发送RTS分组的时间，T为RTS分组结束到发出CTS分组开始的时间



■ 早睡问题

假设传输方向A→B→C→D。如果节点A通过竞争首先获得发送数据到节点B，节点A向B发送RTS消息，B应答CTS。C收到B发出的CTS消息而转入睡眠状态，当B接收完数据，节点C醒来以便接收节点B发送给它的的数据。D可能不知道A与B的通信存在，在A→B时的通信状态结束后就已经处于睡眠状态，这样，节点C只能等到下一个周期才能传输数据到D。这种通信延迟称为早睡问题。



■ 早睡问题解决方案1：

未来请求发送(future request-to-send, FRTS)当节点C收到B发送给A的CTS分组后，立刻向下一跳的接收者D发出FRTS分组。

FRTS分组包含节点D接收数据前需要等待的时间长度，节点D要在睡眠相应长度时间后醒来接收数据。

由于节点C发送的FRTS分组可能干扰节点A发送的数据，所以节点A需要推迟发

送数据的时间。节点A通过在接收到CTS分组后发送一个与FRTS分组长度相同的DS(data-send)分组实现对信道的占用。DS分组不包含有用信息。
节点A在DS分组之后开始发送正常的的数据信息。FRTS方法可以提高吞吐率，但DS分组和FRTS分组带来了额外的通信开销。

- 早睡问题解决方案2：满缓冲区优先(full buffer priority)

当节点的缓冲区接近占满时，对收到的RTS不作应答，而是立即向目标接收者发送RTS消息，并传输数据给目标节点。

节点B向节点C发送RTS分组，节点C因缓冲区快满不发送CTS，而是向节点D发送RTS，将它的的数据发送给节点D。

该方法的优点是减少了早睡问题发生的可能，并起到了一定的网络流量的控制作用，带来的问题是增加了冲突的可能性。

- 小结

- 在**负载恒定不变**的情况下，T-MAC协议与**采用固定占空比的S-MAC协议**相比，**节能效率**相仿；
- 在**负载恒定不变**的情况下，T-MAC协议与**未采用占空比模式的CSMA协议**相比，能够**节省多达98%的能量**；
- 在**负载动态可变**的情况下，T-MAC协议与**S-MAC协议**相比，更加**节省能量**。

- Sift协议：

- 针对**基于事件驱动**的传感器网络提出的基于竞争的MAC协议，考虑了传感器网络以下三个特性：

- **传感器网络的空间相关性和时间相关性**。当一个事件发生时，多个邻近节点会同时监测到该事件，这些邻居节点因而会形成事件检测的空间相关性。传感器网络是事件驱动的网络，一个事件的发生会促使同时观察到该事件的多个节点发送消息，而这些邻近节点往往竞争共享的无线信道，形成事件传递的时间相关性。
- **不是所有节点都需要报告事件***。在很多传感器网络应用中，并不是所有监测到事件发生的节点都需要发送消息，只要这些节点中的一部分发送消息到汇聚节点就足够了。
- **感知事件的节点密度随时间变化**。由于传感器网络由大量节点组成，网络内节点**密度会随着时间的推移而发生变化**。当目标进入监测区域后，监测到目标的传感器节点数目会随着时间的移动而不断变化。

- Sift协议的设计目标：

当共享无线信道的N个传感器节点同时监测到同一事件时，希望R个节点($R \leq N$)能够在最短时间内无冲突成功发送出事件监测消息，抑制剩余(N-R)个节点的消息发送。

- 在通常**基于窗口的竞争性MAC协议**在传感器网络中存在如下**问题**:

- (1)多个节点可能会同时监测到一个事件，并同时发送数据，这容易造成事件发生区域的节点同时闲忙，导致忙时竞争频繁，需要经过很长时间调整CW值，以适应发送节点的数目；
- (2)如果初始CW值很大，而同时监测一个事件的节点数目很少时，就会造成报告事件的延迟较大；
- (3)CW取值是要保证所有活动节点都有机会发送数据，而传感器网络只需要N个活动中有R个节点能够无冲突地报告事件。

- Sift协议的核心思想：

采用**CW值固定的窗口**，节点不是从发送窗口选择发送时槽，而是在**不同的时槽选择不同的发送概率**。因此，sift协议的关键在于如何在不同时槽为节点选择合适的发送概率分布，使得检测到同一个事件的多个节点能够在竞争窗口前面的各个时槽内不断无冲突地发送消息。

- Sift协议的工作原理:

如果节点有消息需要发送，则首先假想当前共有N个节点与其竞争发送；如果在第一个时槽

内，节点本身不发送消息，也没有其他节点发送消息，节点就**减少假想的竞争发送节点的数目**，并相应地增加选择在第二个时槽发送数据的概率；如果节点没有选择第二个时槽，而且在第二个时槽上还没有其他节点发送消息，节点再**减少假想的竞争发送节点数目**，进一步增加选择第三个时槽发送数据的概率。以此类推，节点选择在第 r 个时槽发送数据的概率 P_r 为

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

为分布参数。如果在选择时槽过程中有其他节点发送消息，节点要重新开始竞争过程。该MAC协议命名为“sift”的含义就是通过非均匀概率分布将获胜节点从整个竞争节点集中筛选(sift)出来。

■ Sift协议

的选择与 N 和 CW 值相关。Sift协议的设计希望满足下面的性质：

- 在第一个时槽，当存在 N 个节点需要发送数据时，有且仅有一个节点在这个时槽中成功发送数据的概率高；
- 在第二、第三...直到发送窗口的最后的一个时槽中，有且仅有一个节点在时槽中成功发送数据的概率也高。
- Sift协议不同于传统窗口的MAC协议，但对接收节点的空余状态考虑较少，需要节点间保持时钟同步。
- 分簇网络中，节点在区域上距离较近，多个节点往往同时检测到同一事件，而且只需部分节点将消息传输给簇头。Sift协议适合在分簇网络中使用。

○ 基于竞争的MAC协议：

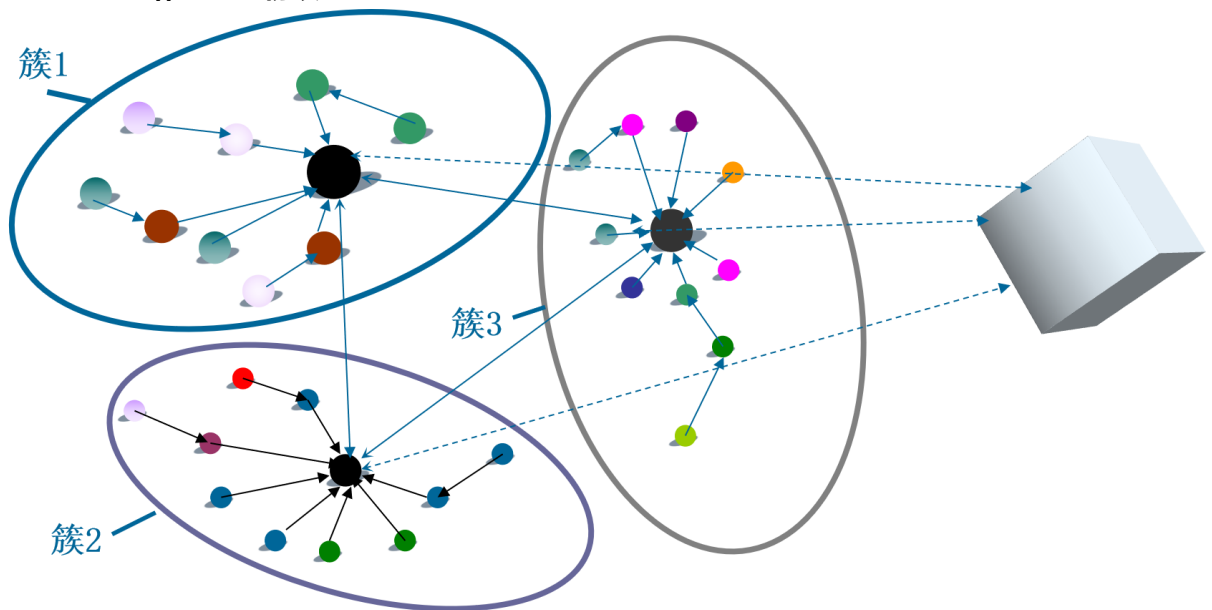
上述基于竞争的MAC协议具有良好的扩展性，并且不要求严格的时钟同步，但它们往往只是从发送数据的节点考虑问题，对接收节点的考虑相对较少。

在基于竞争的MAC协议中，节点发送数据时**竞争**使用无线信道，并通知接收节点及时处于接收状态。节点**处于睡眠状态**可能造成通信暂时中断，增大消息的传播延迟，所以在节省节点能量和增大消息延迟之间需要权衡。

● 基于时分复用的MAC协议

- 在传感器网络中采用TDMA机制，就是为每个节点分配独立的用于数据发送或接收的时槽，而节点在其他空闲时槽内转入睡眠状态。
- TDMA机制的**一些特点**非常适合传感器网络节省能量的要求：
 - TDMA机制没有竞争机制的碰撞重传问题；
 - 数据传输时不需过多的控制信息；
 - 节点在空闲时槽能够及时进入睡眠状态。
- TDMA机制需要节点之间比较严格的**时间同步**。时间同步是传感器网路的基本要求：多数传感器网络都使用了侦听/睡眠的能量唤醒机制，利用时间同步来实现节点状态的自动转化；节点之间为了完成任务需要协同工作，这同样不可避免地需要时间同步。
- TDMA机制在**网络扩展性**方面存在不足：很难调整时间帧的长度和时槽的分配；对于传感器网络的节点移动、节点失效等动态拓扑结构适应性较差；对于节点发送数据量的变化也不敏感。

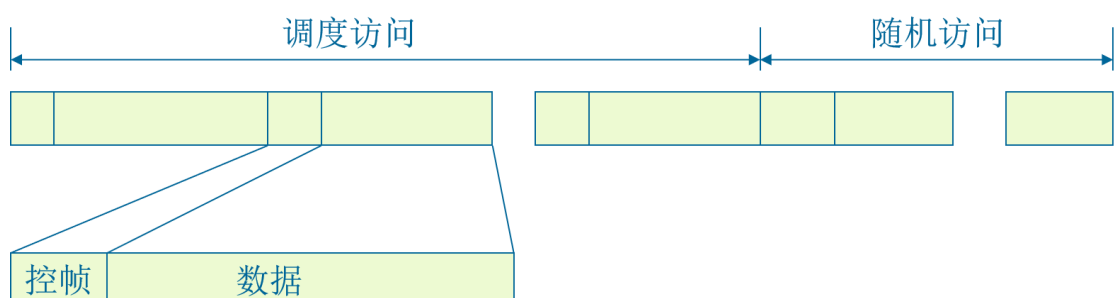
基于分簇网络的MAC协议



- 所有传感器节点固定划分或自动形成多个簇，每个簇内有一个簇头节点，簇头负责为簇内所有传感器节点分配时槽，收集和簇内传感器节点发来的数据，并将数据发送给汇聚节点。
- 在基于分簇网络的MAC协议中，节点状态分为感应(sensing)、转发(relaying)、感应并转发(sensing & relaying)、非活动(inactive)四种状态。
- 节点在感应状态时，采集数据并向其相邻节点发送；在转发状态时，接收其他节点发送的数据并发送给下一个节点；在感应并转发状态的节点，需要完成上述两项的功能；节点没有数据需要接收和发送时，自动进入非活动状态。
- 为了适应簇内节点的动态变化、及时发现新的节点、使用能量相对高的节点转发数据等目的，协议将时间帧分为周期性的四个阶段：
 - 数据传输阶段：簇内传感器节点在各自分配的时槽内，发送采集数据给簇头。
 - 刷新阶段：簇内传感器节点向簇头报告其当前的状态；
 - 刷新引起的重组阶段：紧跟在刷新阶段之后，簇头节点根据簇内节点的当前状态，重新给簇内节点分配时槽。
 - 事件触发的重组阶段：节点能量小于特定值、网络拓扑发生变化等事件发生时，簇头就要重新分配时槽。通常在多个数据传输阶段后有这样的事件发生。
- 簇头节点要求具有比较强的处理和通信能力，能量消耗较大，如何合理选择簇头节点是一个需要深入研究的问题。

DEANA协议

- 分布式能量感知节点活动(distributed energy-aware node activation, DEANA)协议将时间帧分为周期性的调度访问阶段和随机访问阶段。调度访问阶段由多个连续的数据传输时槽组成，某个时槽分配给特定节点用来发送数据。除相应的接收节点外，其他节点在此时槽处于睡眠状态。随机访问阶段由多个连续的信令交换时槽组成，用于处理节点的添加、删除以及时间同步等。



为了进一步节省能量，在调度访问部分中，每个时槽又细分为控制时槽和数据传输时槽。控制时槽相对数据时槽而言长度很短。如果节点在其分配的时槽内有数据需要发送，则在控制时槽发出控制信息，指出接收数据的节点，然后在数据传输时槽发送数据。在控制时槽内，所有节点都处于接收状态。如果发现自己不是数据的接收者，节点就进入睡眠状态，只有数据的接收者才在整个时槽内保持接收状态。这样能有效减少节点接收不必要的的数据。

- **与传统的TDMA协议相比**，DEANA协议在数据传输时槽前加入了一个**控制时槽**，使节点在得知不需要接收数据时进入睡眠状态，但是该协议对节点的**时间同步精度**要求较高。

○ 基于周期性调度的MAC协议

-针对节点需要周期性发送数据的特定传感器网络应用，学者提出了周期性消息调度的MAC协议。

- 协议假设所有节点之间都是时间同步的，节点发送的消息由多个固定长度的分组组成，每个消息都有生存时间的限制，消息产生后必须在给定时间内发送出去，否则该消息即使发送出去也没有意义。
- 时间被划分为连续的长度相同的时槽，时槽长度是发送一个固定分组需要的时间。
- 为了分配节点的消息到相应的时槽中又不产生冲突，采用**集中式**和**分布式**两种调度方法：
 - **集中式调度方法**是按照节点顺序依次分配消息到时槽中。第一个节点的初始相位为0，其他节点的初始相位为当前空余的第一个时槽。协议根据节点*i*产生消息的时间周期间隔给节点*i*分配时槽，能够无冲突地为所有节点分配满足自身消息周期的发送时槽。
 - **分布式调度方法**中，节点为了减少获取初始相位时槽引起的竞争概率，等待其消息周期时间避免不同周期节点间的冲突，并在等待时间结束后竞争空闲信道。节点赢得竞争后按照消息周期分配发送消息时槽。

○ TRAMA协议

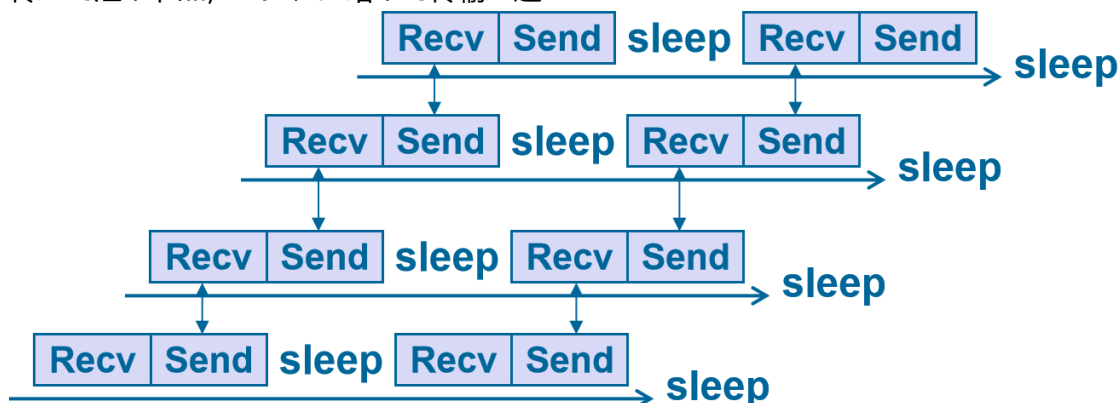
流量自适应介质访问(Traffic adaptive medium access,TRAMA)协议将时间划分为连续时槽，根据局部两跳内的邻居节点信息，采用分布式选举机制确定每个时槽的无冲突发送者。同时，通过避免把时槽分配给无流量的节点，并让非发送和接收节点处于睡眠状态达到节省能量的目的。

- TRAMA协议包括邻居协议NP (neighbor protocol)、调度交换协议SEP (schedule exchange protocol)和自适应时槽选择算法AEA (adaptive election algorithm)。
- 在TRAMA协议中，为了适应节点失败或节点增加等引起的网络拓扑结构变化，将时间划分为交替的随机访问周期和调度访问周期，相应地时槽个数根据具体应用情况而定。随机访问周期主要用于网络维护，如新节点加入、已知节点失效等引起的网络拓扑变化要在随机访问周期内完成。
- **NP协议**：NP协议在随机访问周期内执行，节点通过NP协议以竞争方式使用无线信道。协议要求节点周期性通告自己的节点编号ID，是否有数据需要发送以及能够直接通信的邻居节点的相关信息，并实现节点间的时间同步。
- **SEP协议**：调度交换协议SEP用来建立和维护发送者和接收者的调度信息。在调度访问周期内，节点周期性向邻居广播它的调度信息。
- **AEA算法**：节点有发送、接收和睡眠三种状态。在调度访问周期内的给定时槽，节点处于发送状态当且仅当它有数据需要发送，且在竞争者中有最高的优先级；节点处于接收状态当且仅当它是当前发送节点指定的接收者；其他情况下，节点处于睡眠状态。每个节点在调度周期的每个时槽上运行AEA算法。该算法根据当前两跳邻居节点内的节点优先级和一跳邻居的调度信息，决定节点在当前时槽的活动策略：发送、接收、或是睡眠。

○ DMAC协议

传感器网络中一种重要的通信模式是多个传感器节点向一个汇聚节点发送数据。所有传感器节点转发收到的数据，形成一个以汇聚节点为根节点的树型网络结构，称为采集树(data gathering tree)。DMAC协议就是针对这种数据采集树结构提出的，目标是减少网络能量消耗和减少数据的传输延迟。

- **DMAC的核心思想**是采用交错调度机制。将节点划分为接收时间，发送时间和睡眠时间。其中接收时间和发送时间相等，均为发送一个数据的分组时间。每个节点的调度具有不同的偏移，下层节点的发送时间对应上层节点的接收时间。这样，数据能够连续地从数据源节点传送到汇聚节点，减少在网络中的传输延迟。



- DMAC协议采用**ACK应答机制**，发送节点如果没有收到ACK应答，要在下一个发送时间重发。节点正确接收到数据后，立刻发送ACK消息给发送数据的节点。
- 为了减少发送数据产生的冲突，节点在等待固定的后退时间(backoff period,BP)后，在冲突窗口(content window,CW)内随机选择发送等待时间。
- 接收节点在发送ACK消息时，采用短时间段(short period,SP)的固定延迟。一次数据通信过程需要的时间长度U为

$$U = BP + CW + DATA + SP + ACK$$
- 其他类型的MAC协议
 - 基于TDMA的MAC协议虽然具有很多优点，但**网络扩展性较差**，需要**节点间严格的时间同步**，对于能量和计算能力都**有限**的传感器节点而言其实现是很困难的。
 - 考虑通过FDMA或者CDMA与TDMA**相结合**方法，为每对节点分配互不干扰的信道实现消息传输，从而避免了共享信道的碰撞问题，增强了协议的扩展性。
 - SMACS/EAR协议
 - **结合TDMA和FDMA**的基于固定信道分配的MAC协议。其基本思想是为每一对邻居节点分配一个特有频率进行数据传输，不同节点对间的频率互不干扰，从而避免同时传输的数据之间产生碰撞。
 - SMACS/EAR协议不要求所有节点时间同步，只需要两个通信节点保持相对的帧同步。
 - 基于CDMA方式的信道分配协议
 - CDMA机制为每个用户分配特定的具有正交性的地址码，因而在频率、时间和空间上**都可以重叠**。
 - 在传感器网络中应用CDMA技术就是为每个传感器节点分配与其他节点正交的地址码，这样即使多个节点同时传输消息，也不会互相干扰,从而解决信道冲突问题。