



# 主要内容

- **ISA100与ISA100.11a标准概述**
- ISA100.11a协议开发关键技术



# 标准概述内容

- ISA、ISA100与ISA100.11a简介
- ISA100.11a设备类型
- ISA100.11a网络拓扑与形态
- ISA100.11a协议模型
- ISA100.11a时间基准

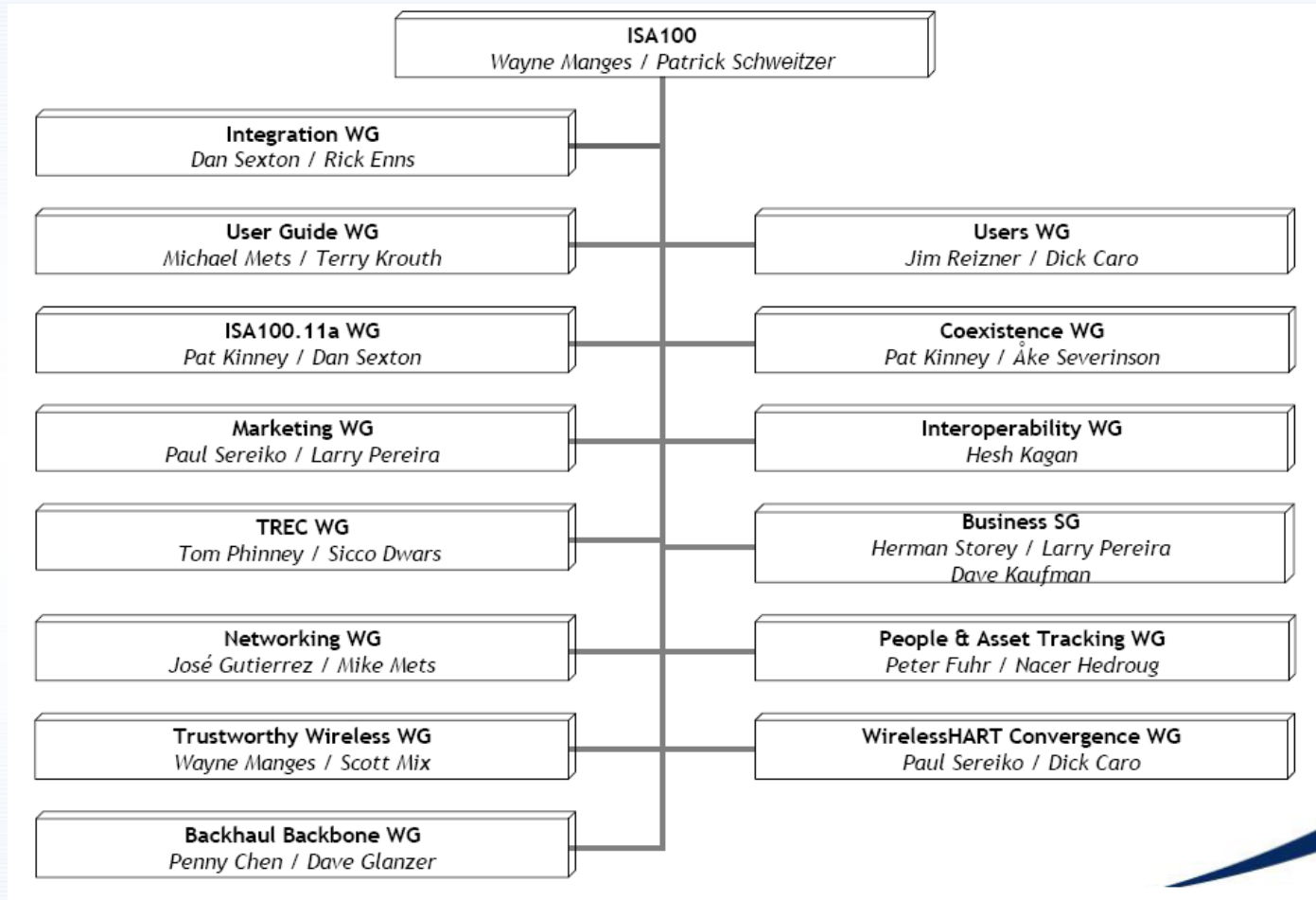


# ISA与ISA100

- ISA，原美国仪器仪表协会，现在更名为国际自动化协会。
  - Instrument Society of America
  - International Society of Automation
  - 制定了大量的国际工业标准
- ISA100是ISA关于工业无线传感器网络领域的分委会。
  - 方向：Wireless Systems for Automation
  - 目标：Develop Global Industrial Wireless Standards
- ISA100.11是ISA100委员会下的第3工作组
  - WG3



# ISA100组织架构



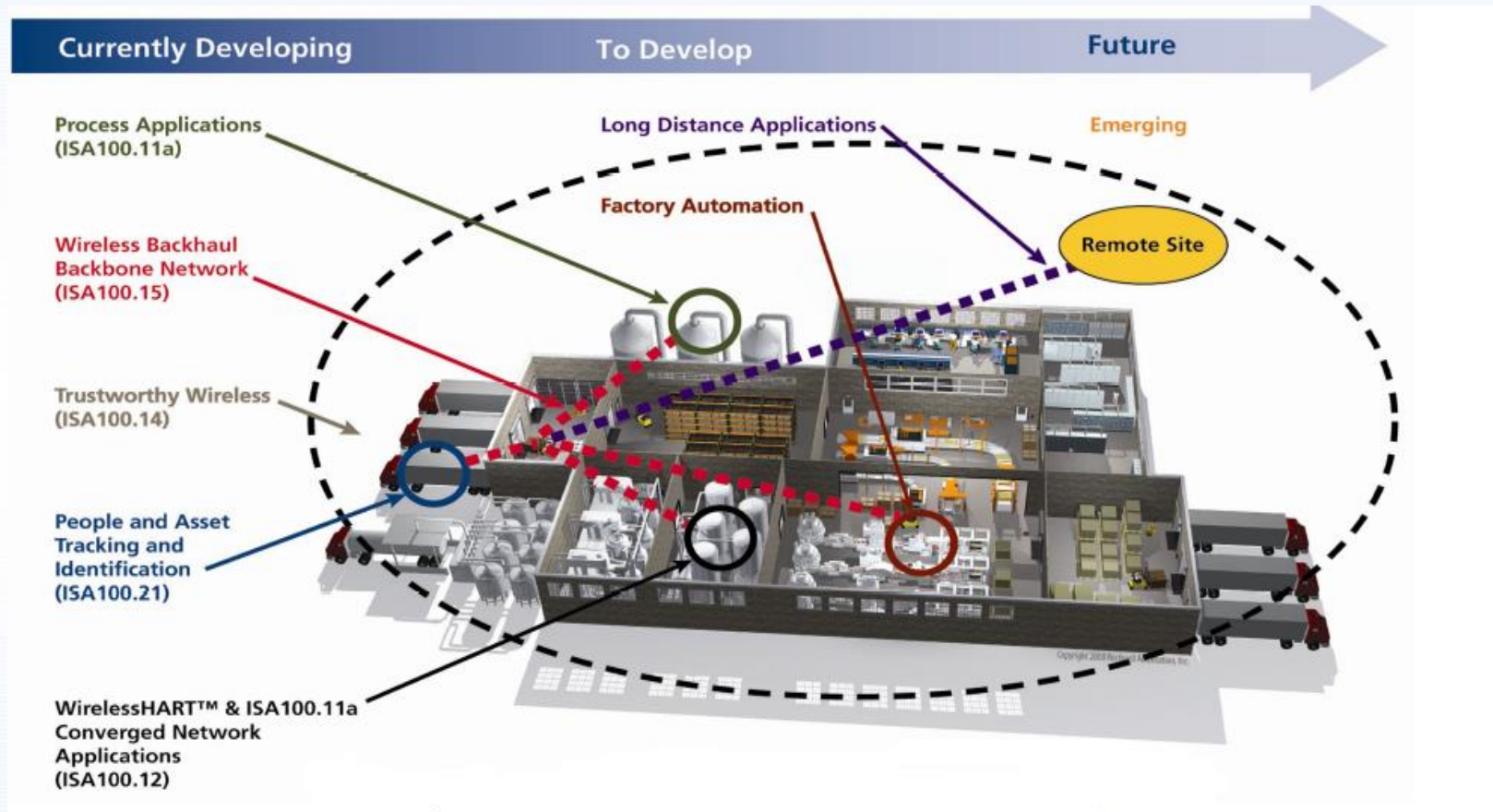


# 参与ISA100标准的公司



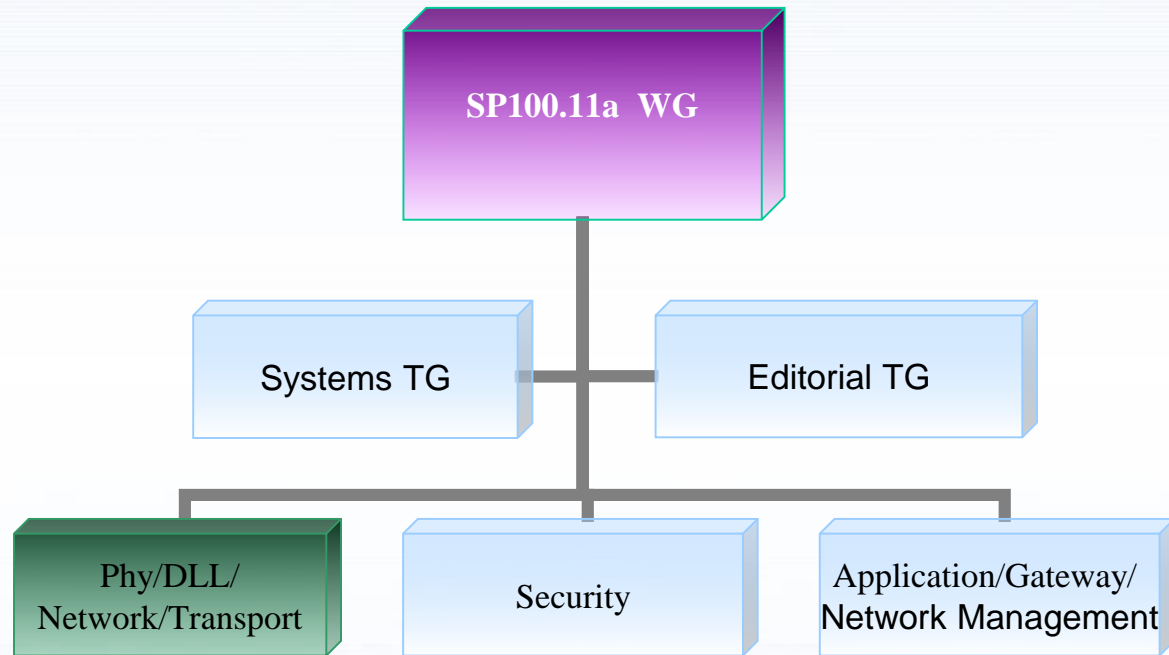


# ISA100计划制定的标准





# ISA100.11a WG组织结构







# ISA100.11a WG主席



- Pat Kinney
  - ISA100.11a WG chair
  - IEEE 802.15 WG vice chair, TG chair
  - ZigBee WG chair
- Dan Sexton
  - GE Global Research





# 工作组会议



- 会上辩论是主体
- 会下是朋友
- 陈述—讨论—投票

一个标准只有得到大多数公司的认同后才有生命力，所以标准的制定是一个各方技术融合和妥协的过程。





# ISA100.11a标准制定过程

- 2005年，ISA100委员会成立
- 2006年7月，向全球征集提案
- 2006年9月，提案陈述
- 2006年10月，提案白皮书
- 2006年12月，成立各个TG，确立采用802.15.4作为物理层
- 2007年2月，各TG开始进行标准的细节讨论
- 2007年8月，各TG完成操作原则
- 2008年3月，完成第一版标准草案
- 2008年4月，第一版标准以一票之差未达到2/3多数
- 2008年8月，征集各方对标准草案的意见，修订标准
- 2009年3月，完成第二版标准草案
- 2009年5月，标准草案在ISA100委员会通过
- 2009年9月，ISA正式通过并发布ISA100标准
- 2009年——，向ANSI提交，向IEC提交
- 2010年10月，完成修订版



# 用户分类层次

<b>Safety</b>	<b>Class 0 : Emergency action</b> (always critical)
<b>Control</b>	<b>Class 1: Closed loop regulatory control</b> (often critical)
	<b>Class 2: Closed loop supervisory control</b> (usually non-critical)
	<b>Class 3: Open loop control</b> (human in the loop)
<b>Monitoring</b>	<b>Class 4: Alerting</b> Short-term operational consequence
	<b>Class 5: Logging &amp; downloading/uploading</b> No immediate operational consequence

Importance of  
message timeliness increases



# ISA100.11a 的目标

- 支持用户分类层次1-5级
- 延迟在100ms级别
- 用于周期性监视和过程控制
- 支持固定、手持和缓慢移动(moving)的设备
- 支持安全和系统管理



# ISA100.11a的优势

- 标准本身是完全开放的（Open）
  - 不需要加入任何组织即可使用
  - 可通过Internet方便获取
  - 除版权外，不对标准文档的下载进行限制
- 对终端用户来说，容易使用和部署（Easy）
- 支持不同厂家设备之间的互操作（Interoperable）



# ISA100.11a网络的特点

- 网络规模可自由扩展
- 设备入网和维护等操作简单方便
- 工作在不需要授权的频段
- 良好的冗余性
- 支持确定性调度
- 自检测、自恢复网络
- 网络层直接支持IP协议
- 多种方式实现与其他无线系统的共存



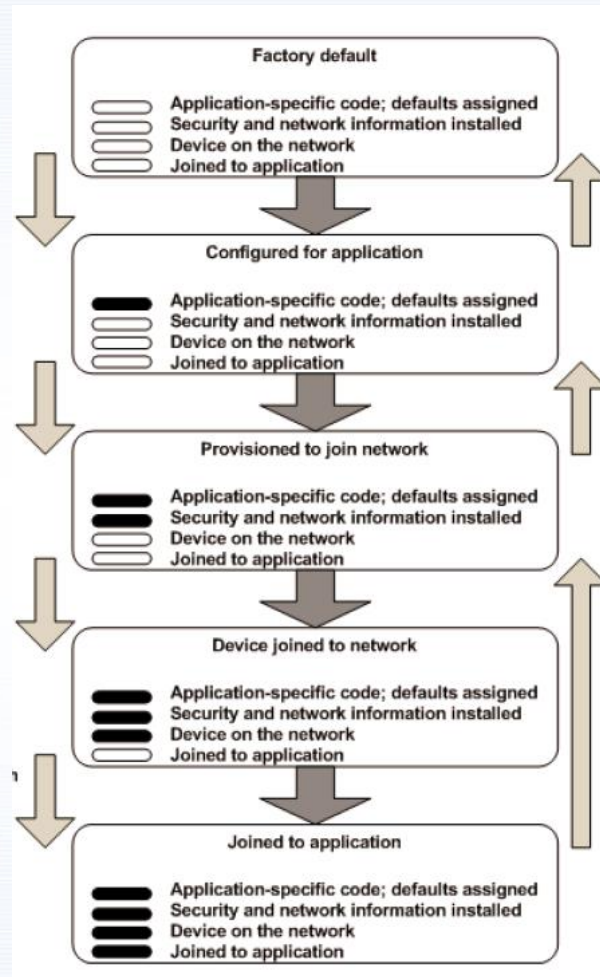
# ISA100设备类型

- 输入/输出设备
- 路由器
- 骨干网路由器
- 网关
- 系统管理器
- 安全管理器
- 系统时间源
- 预配置设备



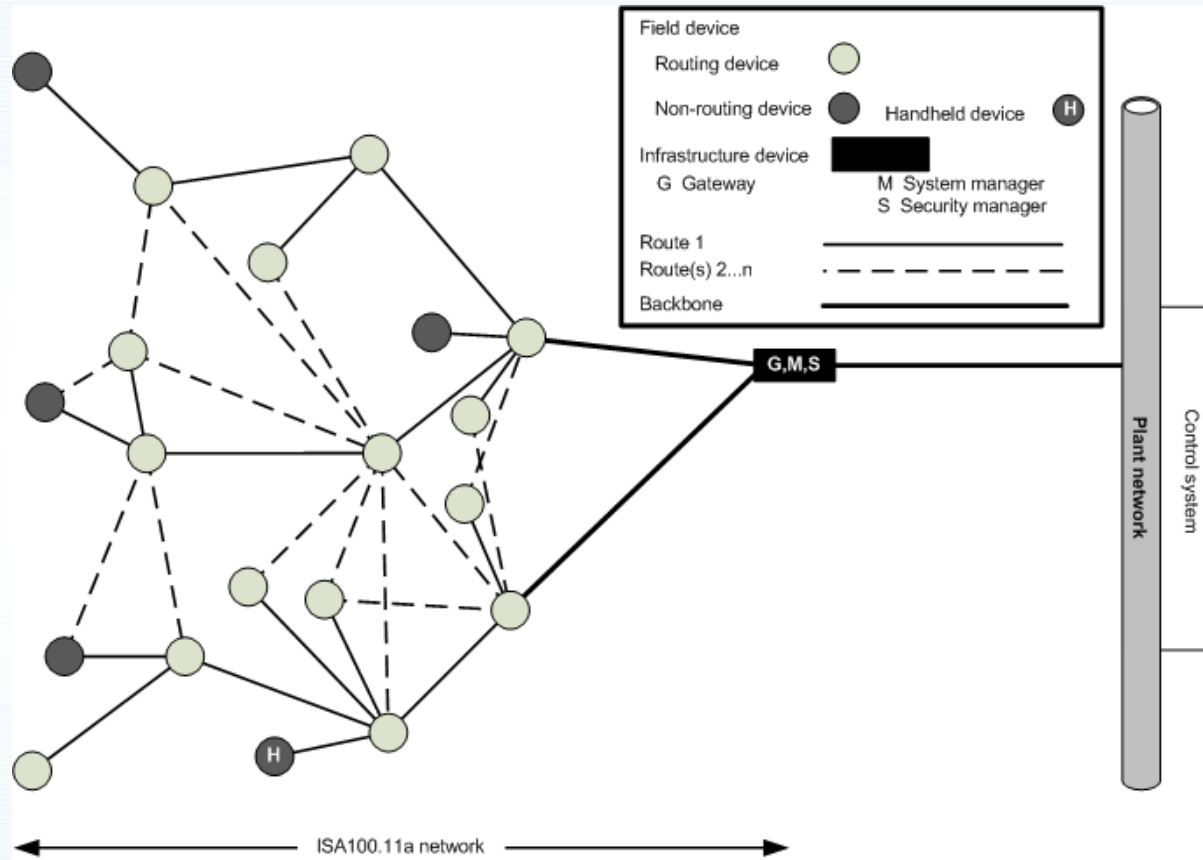


# 设备状态转化



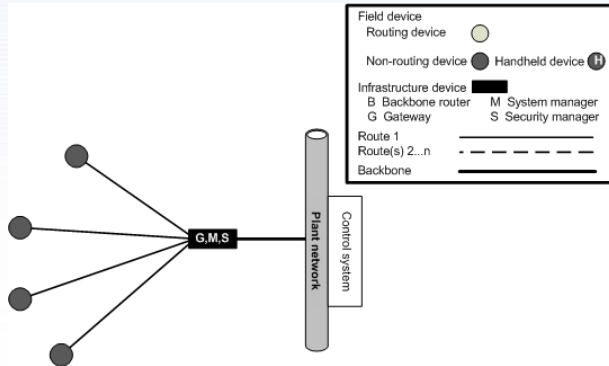


# 一个典型的ISA100网络结构

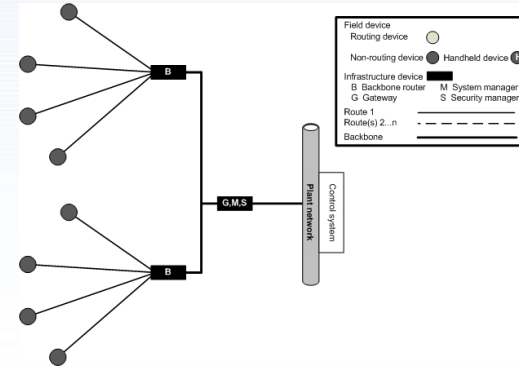




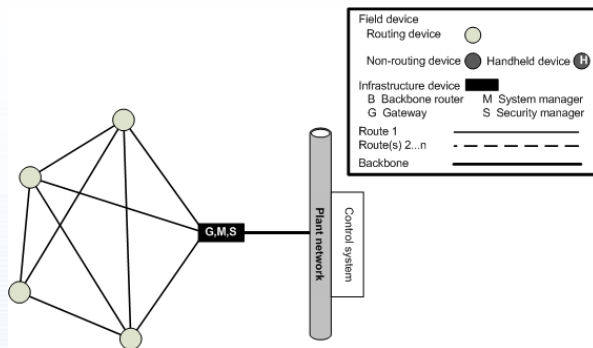
# ISA100支持的网络拓扑



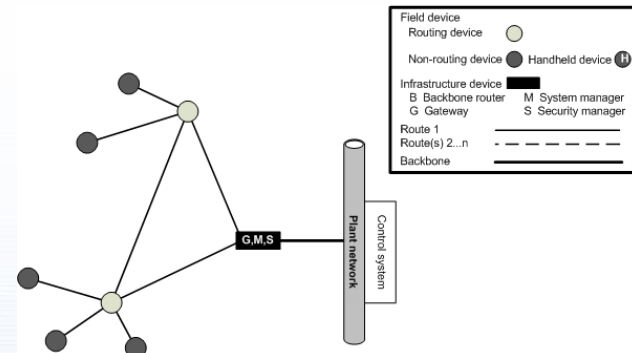
Star



Hub and Spoke



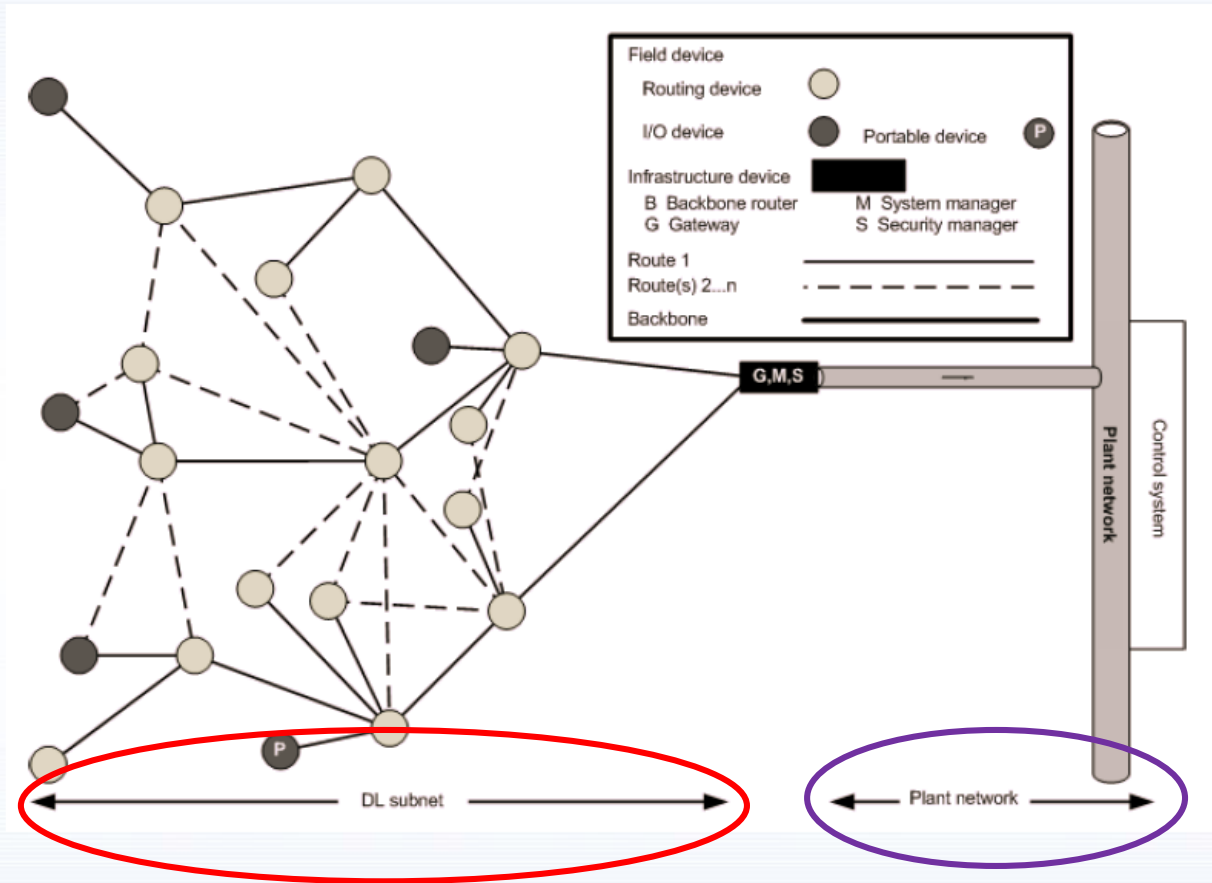
Mesh



Star-Mesh



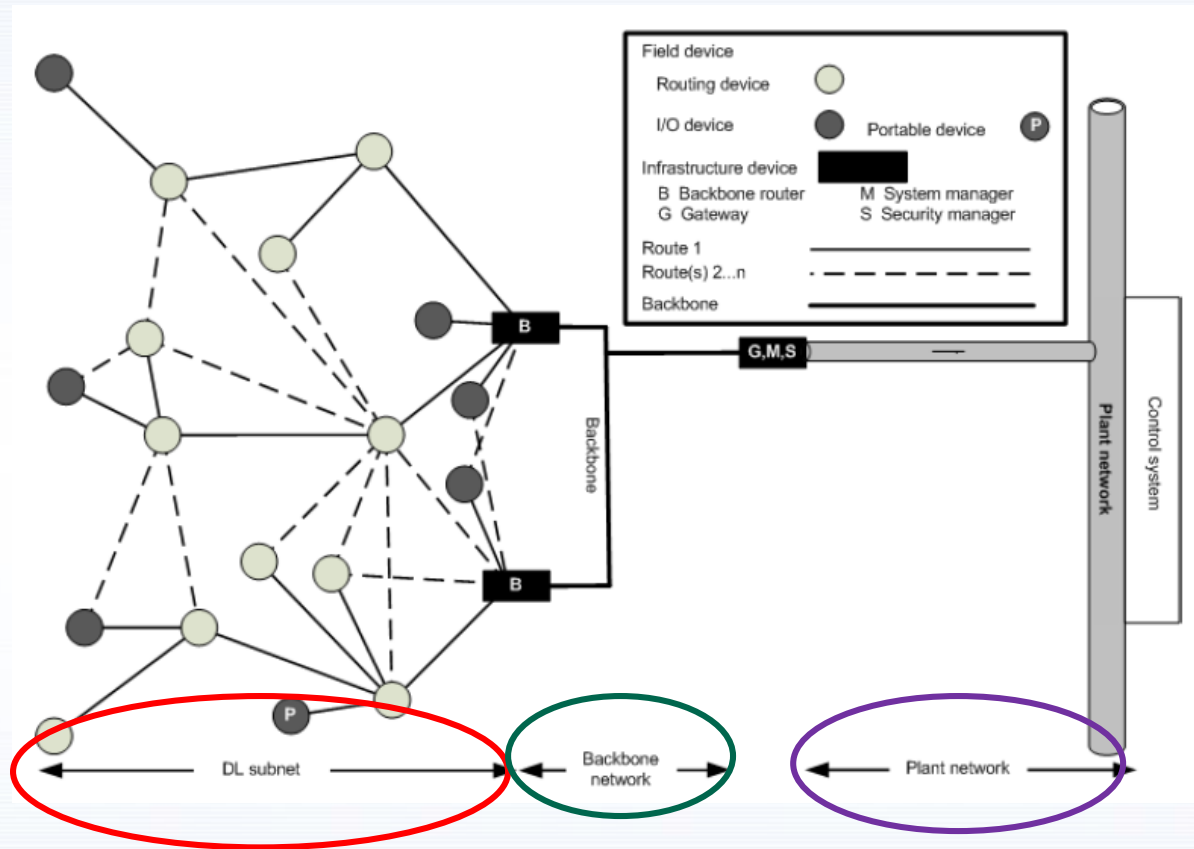
# ISA100网络形态 (1)



ISA100全网与DL子网重合



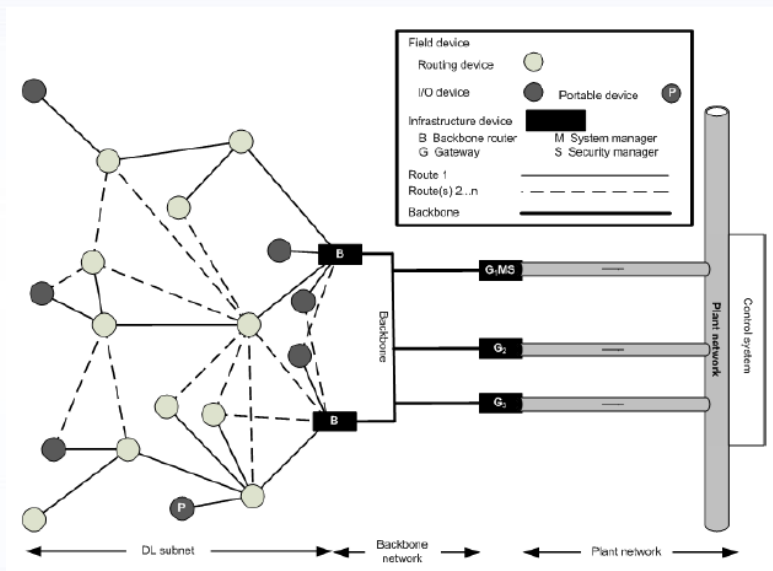
## ISA100网络形态（2）



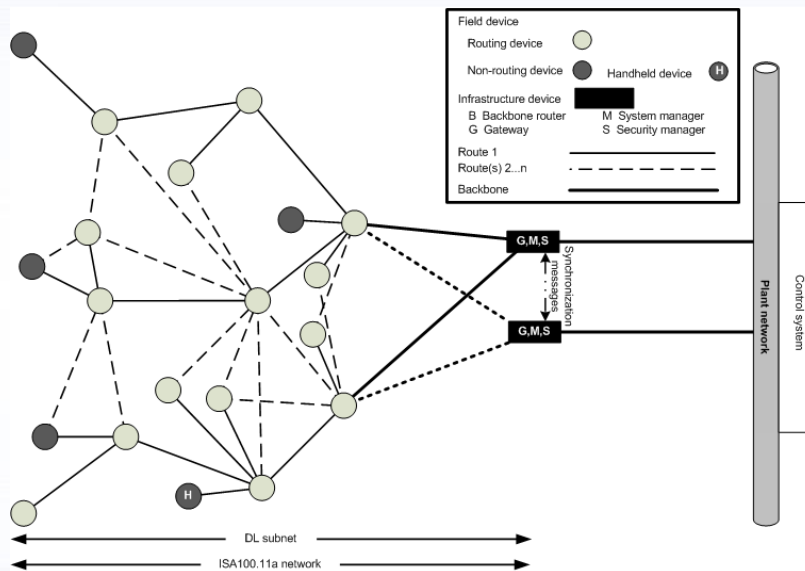
ISA100全网与DL子网不同



# ISA100网络形态（3）



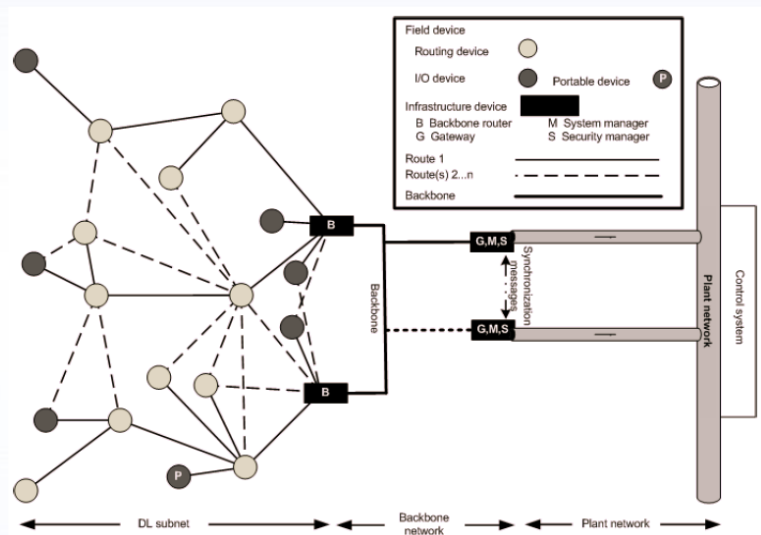
带多重网关



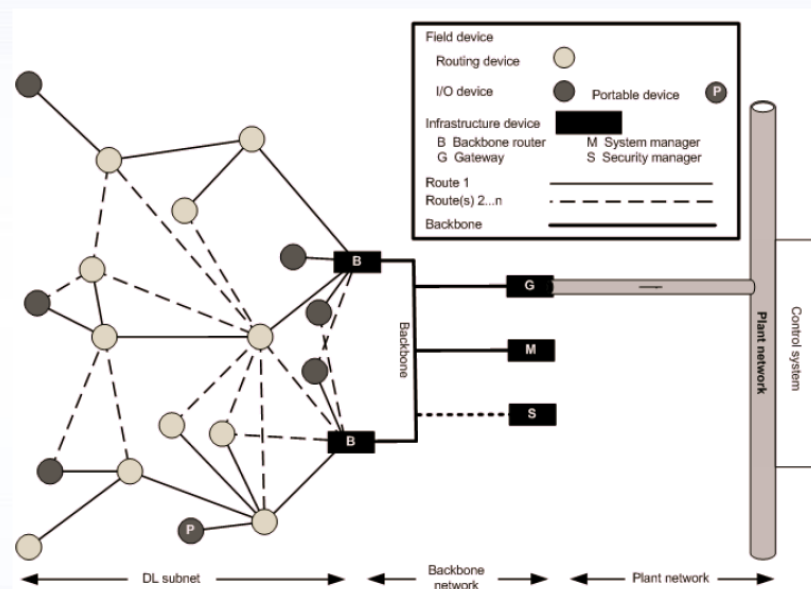
带备份网关（冗余）



# ISA100网络形态（4）



带骨干网

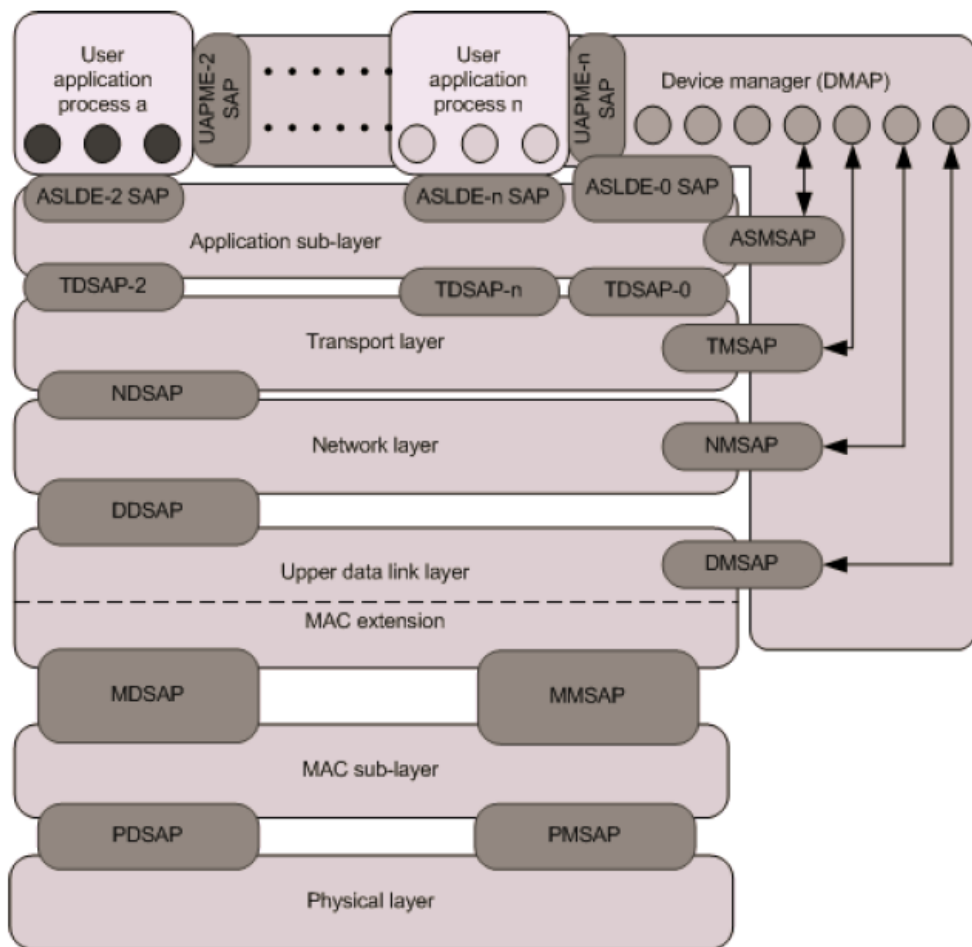


网关、系统管理器、  
安全管理器相互分离





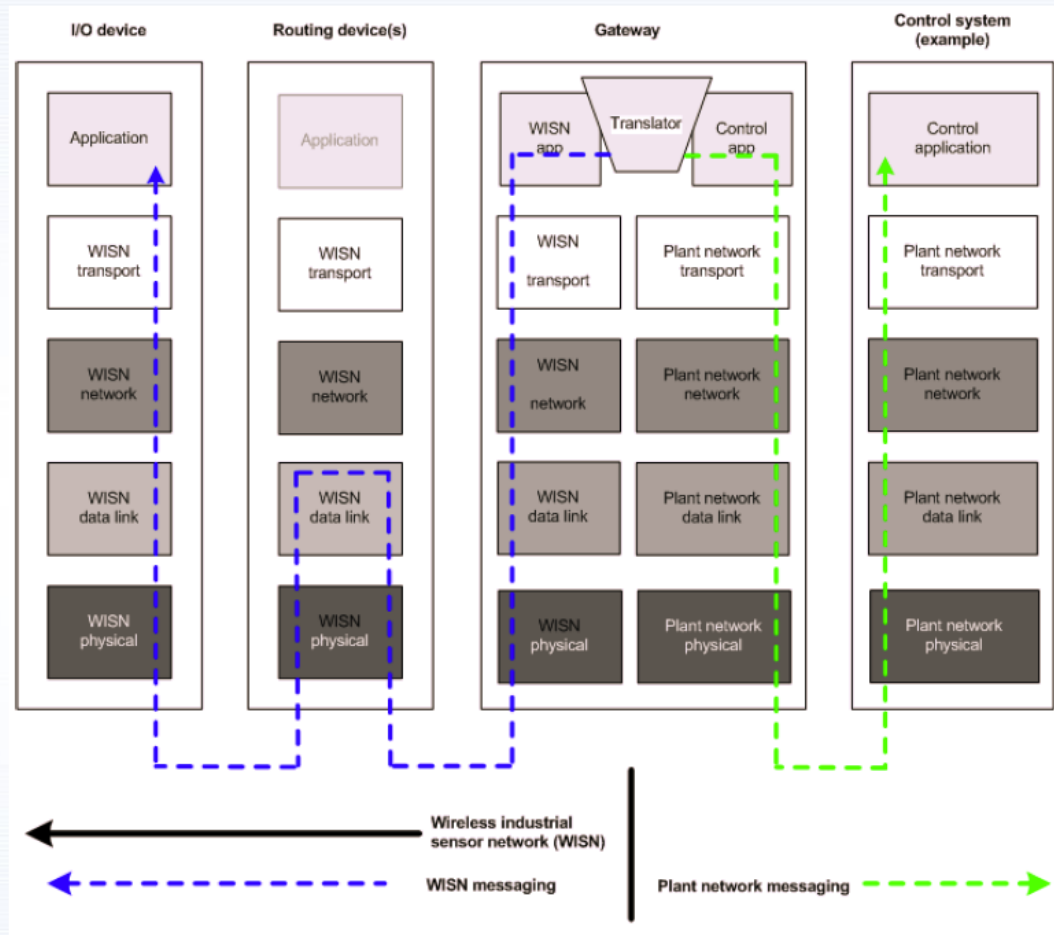
# 协议模型



- 遵循OSI协议模型制定
- 为了兼容802.15.4，在网络层与15.4的MAC层之间构造了ISA100的DLL
- 设备内的系统管理是跨层的，由DMAP统一负责



# 基本的分层数据流





# 时间基准

- 采用International Atomic Time (TAI)时间
  - 相对于1958/01/01 00:00, 所流逝的秒
- 三种级别的时间精度
  - $2^{-15}$  s  $\sim 30.52$   $\mu$ s 2个字节表示
  - $2^{-20}$  s  $\sim 0.95$   $\mu$ s 3个字节表示
  - $2^{-30}$  s  $\sim 0.93$  ns 4个字节表示
- 系统管理器负责向现场设备提供TAI时间到UTC时间的转换
  - 日常所用的时间是UTC, 表示为hh:mm:ss



# 主要内容

- ISA100与ISA100.11a标准概述
- **ISA100.11a**协议开发关键技术



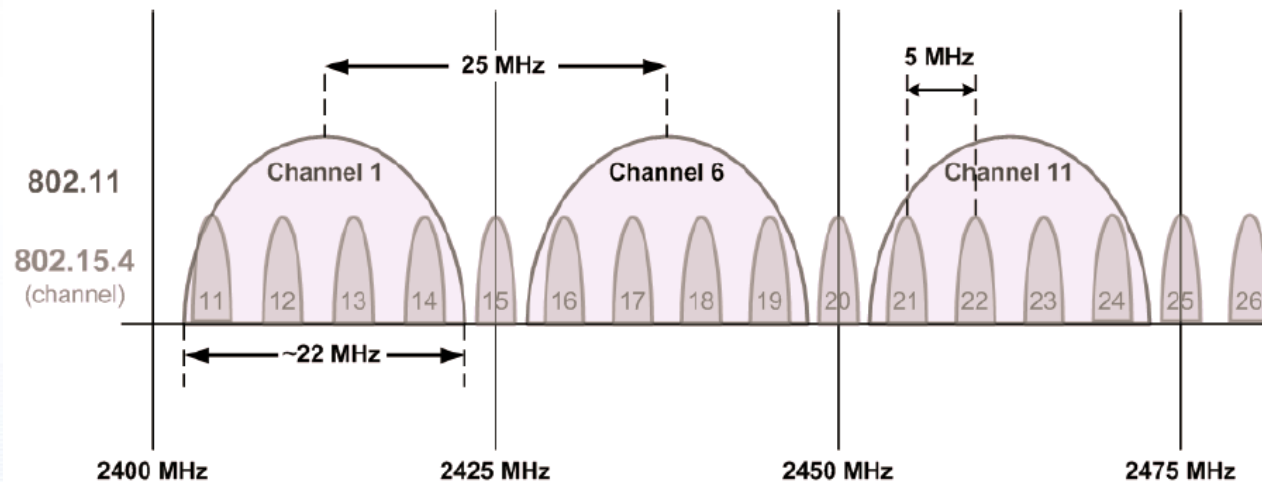
# 关键技术主要内容

- 物理层
- DLL层
- 网络层
- 传输层与应用层
- 网关与安全
- 系统管理



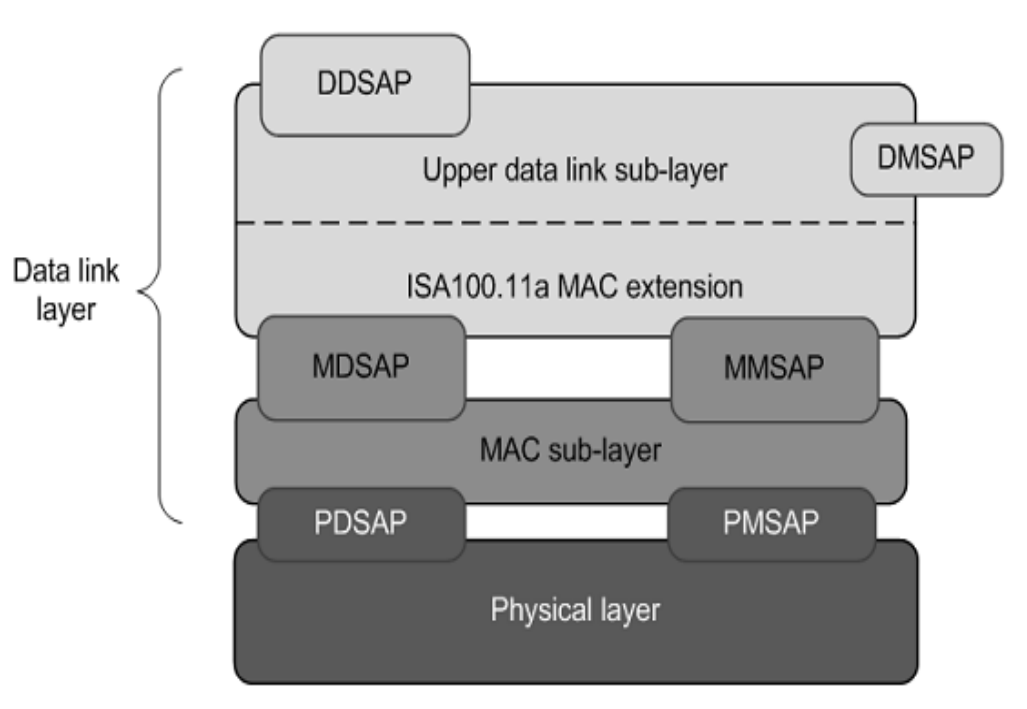
# 物理层

- 物理层基于IEEE 802.15.4
- 仅使用2.4GHz频段，最多16个信道
- 速率 250Kb/s





# DLL层协议结构

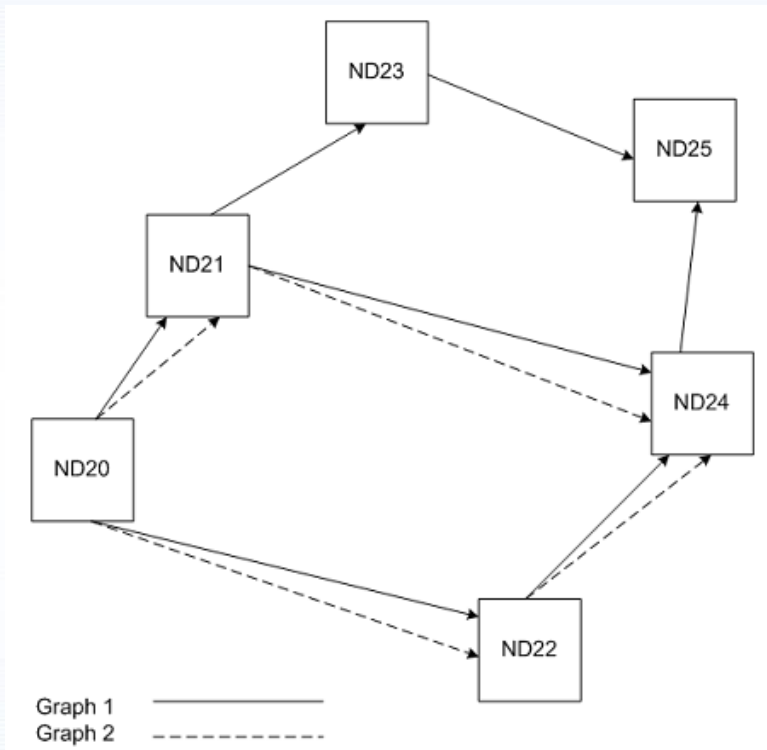


- 分为3个子层
- MAC子层用来兼容802.15.4协议
- MAC扩展层完成传统的DLL层功能
- DLL上层完成Mesh子网内的路由功能





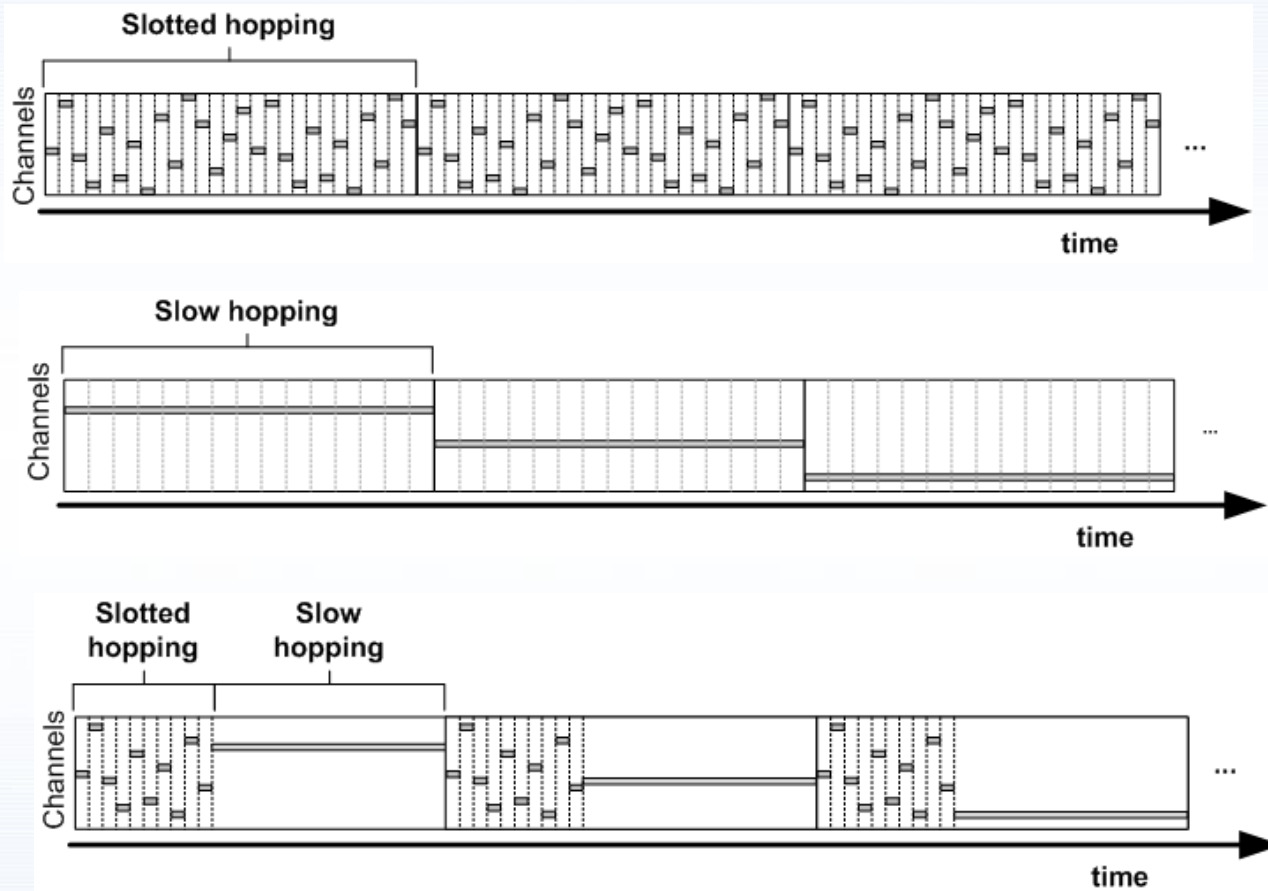
# DLL层路由



- 支持两种路由方法
  - Graph路由
  - 源路由



# 跳信道

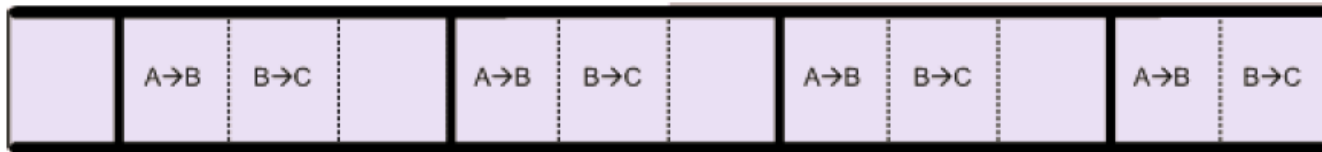


支持三种方式

- 时隙跳信道
- 慢跳信道
- 混合跳信道



# 超帧调度



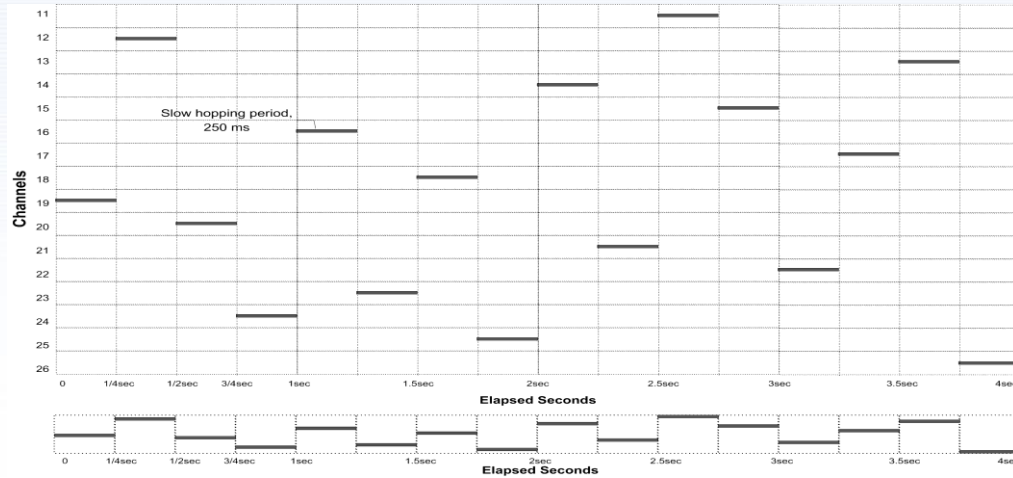
由3个时隙构成的超帧



多超帧

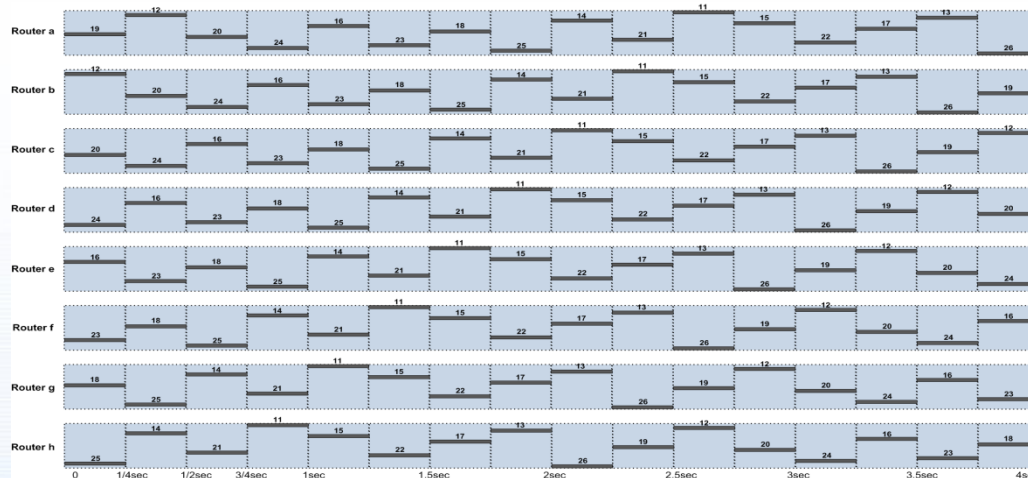


# 跳信道与超帧相结合



单个路由器

频率—时间图



多个路由器

可以同时收发数据



# DLL接入方式

- 非竞争接入方式
  - 通过安排超帧时隙，采用频率复用、时间复用等方式，可以实现在某时刻某频率上只有一个节点接入信道，各节点按照预定顺序非竞争的使用信道。
- 竞争接入方式
  - 在慢跳频方式下，可将多个频率不发生变化的时隙连在一起，构成一个时间段，在此时间段内采用CSMA-CA竞争方式接入信道
  - 同一个时隙也可以多个设备共用，竞争成功的设备最终占有信道。



# 关于DLL层调度的思考

- 工业无线传感器网络除了追求低功耗外，对实时性和确定性也有特殊的要求。
- 通过合理安排时隙，设计调度算法，能够较好的保障实时性和确定性。
- 一个设计良好的MAC层或DLL层协议，应能够针对不同的数据类型提供差异化的服务质量（QoS）。



# WSN中确定性调度算法

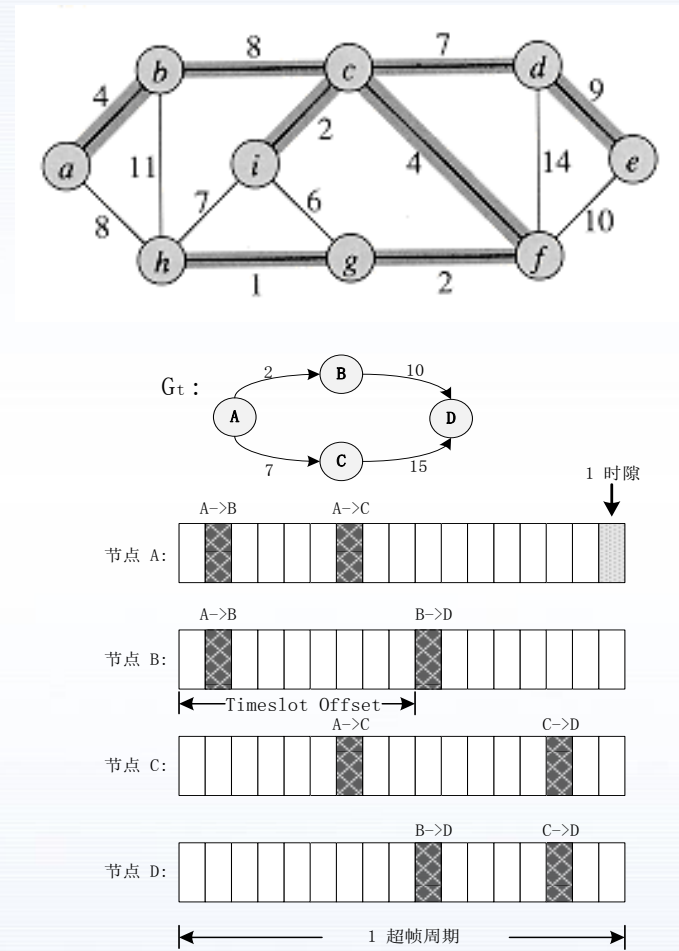
- 在基于时隙的WSN中，确定性调度算法对于系统的性能具有至关重要的影响。
- ISA100并未对确定性调度算法进行标准化，而是指出由各家厂商采用自己的技术进行实现，这是一个技术瓶颈。——标准陷阱。
- 确定性调度算法起源于MAC层，当延伸至全网时，便会扩展到多跳情形，到达网络层。
- 在实际系统中，还应根据具体应用的特征来对确定性调度算法进行优化，从而延伸到传输层和网络层。
- 确定性调度算法可进行跨层设计与优化。
- 对于工业无线传感器网络中确定性调度算法的研究，是当前需要进一步解决的前沿问题。近年来在IEEE Transactions on Industrial Electronics、IEEE Transactions on Industrial Informatics等期刊上刊出较多的文章，值得深入研究。





# 确定性调度与路由算法（1）

- 传统的路由算法追求单一指标的最优化，例如距离最短、链路时延最短、链路质量最好等。
- 经典的最短路径算法：**Dijkstra**算法。
- 在工业无线传感器网络中，除了链路时延外，每个中间路由器都会由于调度的原因，引入新的固定时延。这两项时延决定了多跳数据的实时性和确定性。





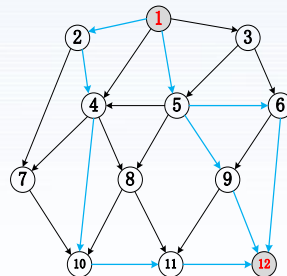
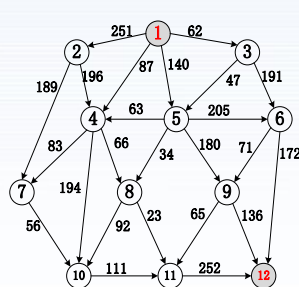
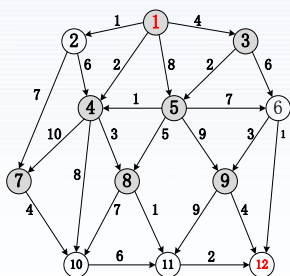
## 确定性调度与路由算法（2）

- 基于确定性调度的路由算法：构造两张图，第一张图以链路时延为权值，表征链路的传输质量；第二张图以各节点的调度时延为权值，表征TDMA接入所导致的等待情况。采用k短路径算法作为基础：
  - **步骤1**：选取网络中链路质量最优的路径；
  - **步骤2**：计算所选取路径上源节点到目的节点的数据传输延时 $t_{pk}$ ，将并与阈值 $t_w$ 进行比较，判断是否符合调度的要求；若符合调度要求就选取此路径作为通信路径；若不符合要求则执行**步骤3**；
  - **步骤3**：从网络中选取链路质量相比上次选取次优的路径；
  - **步骤4**：重复执行**步骤2、3**，直至选取符合条件（1）的路径。

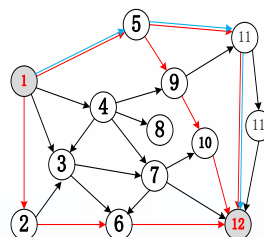
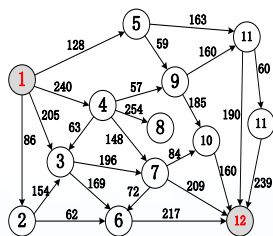
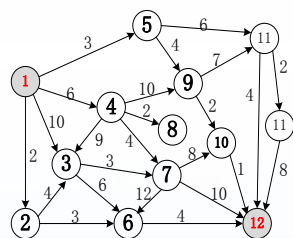


# 确定性调度与路由算法 (3)

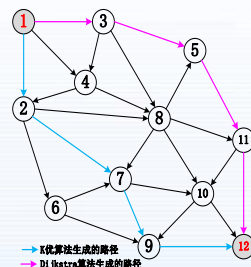
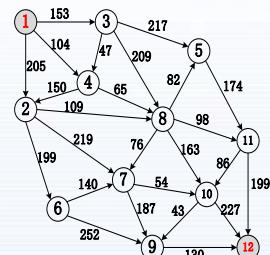
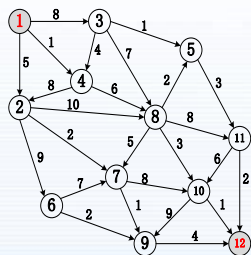
以时隙偏移为权值的加权图 $G_t$     以链路质量为权值的加权图 $G_l$     生成的路径图



仅以链路质量为选路标准：只考虑链路质量，不考虑时隙偏移的话，虽然是 $p_l$ 链路质量最优的路径，网络中从源节点以此路径进行数据发送就无法按要求到达目的节点。



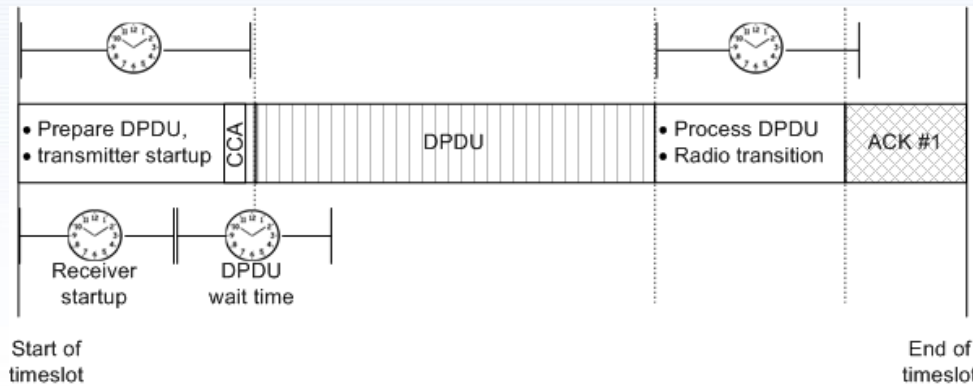
只考虑时隙偏移，在满足调度要求的路径中，有可能链路质量较差，那么就会增加网络开销，浪费通信资源。



采用基于确定性调度的路由算法，同时考虑链路质量和时隙偏移，能够保证在满足确定性要求的前提下，得到链路质量最好的路径。

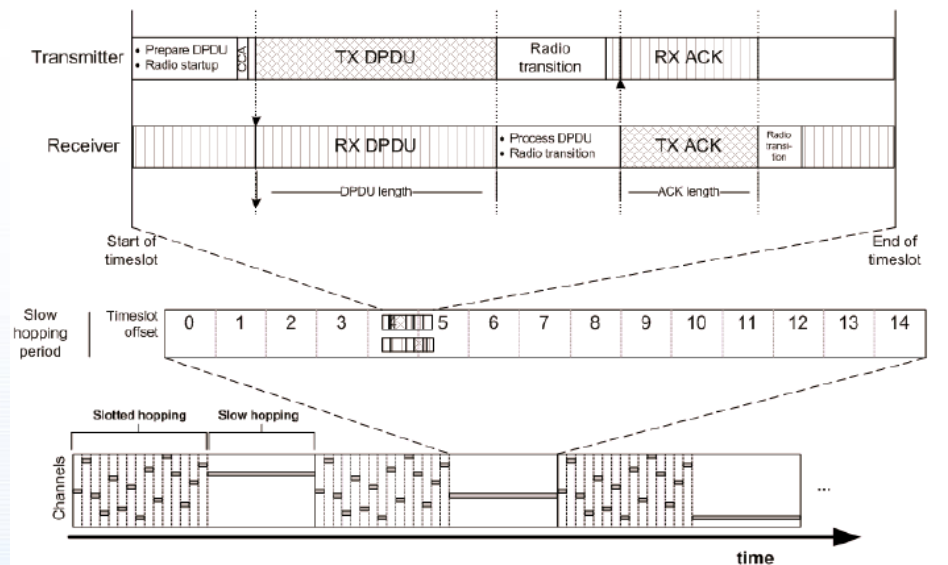


# 时隙内的动作



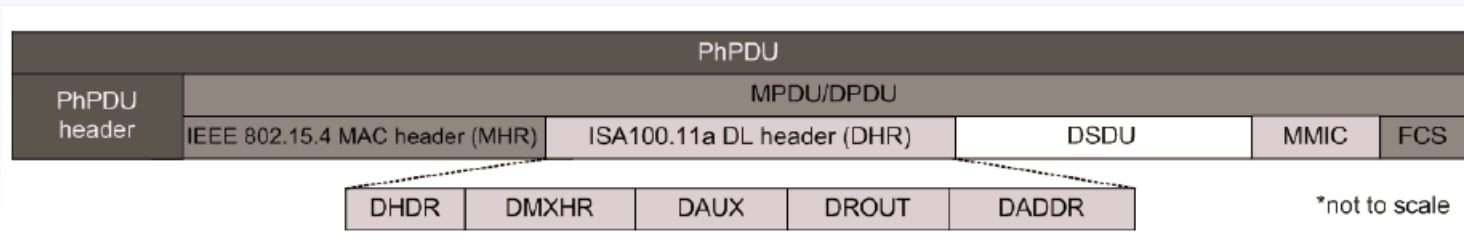
时隙模板与超帧的关系

时隙模板





# DLL帧格式



- DHDR: DL层帧头部域。
- DMXHR: 含有DL层扩展信息，例如跳信道信息等。
- DAUX: 含有广播信息，用于入网、同步等。
- DROUT: 含有子网路由信息。
- DADDR: 含有网络层的源地址和目的地址，对DLL层可见。

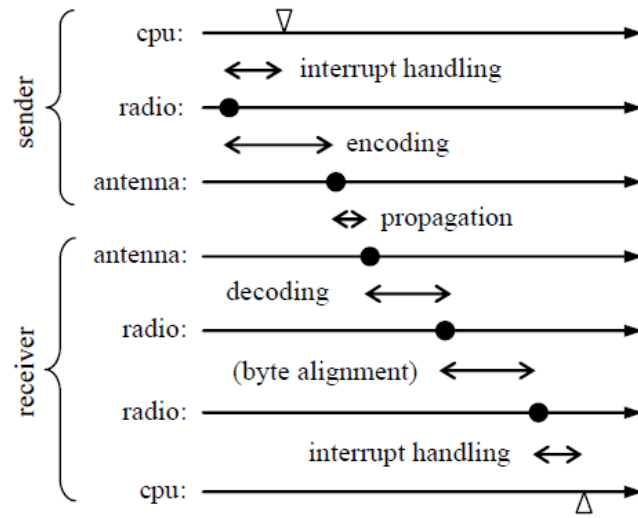
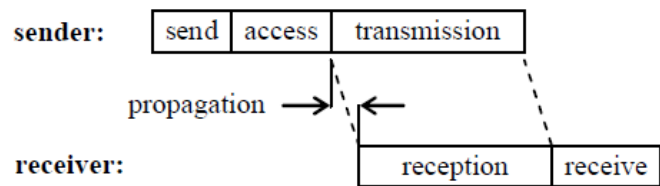


# 时间同步

- 经典的WSN时间同步算法
  - TPSN （一个发送者，一个接收者，类似NTP）
  - FTSP （一个发送者进行单向广播，逐级同步）
  - RBS （一个发送者，多个接收者之间进行同步）
  - PBS （当一对进行同步时，其它节点通过过度侦听实现同步）



# 时间同步误差的来源

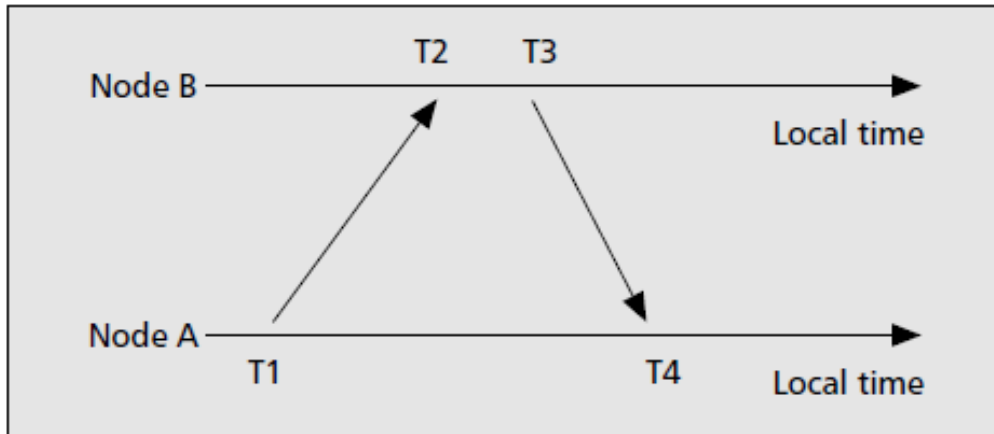


**Table 1. The sources of delays in message transmissions**

Time	Magnitude	Distribution
<b>Send and Receive</b>	0 – 100 ms	nondeterministic, depends on the processor load
<b>Access</b>	10 – 500 ms	nondeterministic, depends on the channel contention
<b>Transmission / Reception</b>	10 – 20 ms	deterministic, depends on message length
<b>Propagation</b>	< 1 $\mu$ s for distances up to 300 meters	deterministic, depends on the distance between sender and receiver
<b>Interrupt Handling</b>	< 5 $\mu$ s in most cases, but can be as high as 30 $\mu$ s	nondeterministic, depends on interrupts being disabled
<b>Encoding plus Decoding</b>	100 – 200 $\mu$ s, < 2 $\mu$ s variance	deterministic, depends on radio chipset and settings
<b>Byte Alignment</b>	0 – 400 $\mu$ s	deterministic, can be calculated



# TPSN



- 以NTP协议为基础设计
- 设两个节点之间的时钟偏移为 $\Delta$ ，同步数据包的传播时延为 $d$ ，则同步计算过程如右侧所示。

$$T_2 = T_1 + \Delta + d$$

$$T_4 = T_3 - \Delta + d$$



$$d = \frac{(T_2 - T_1) + (T_4 - T_3)}{2}$$

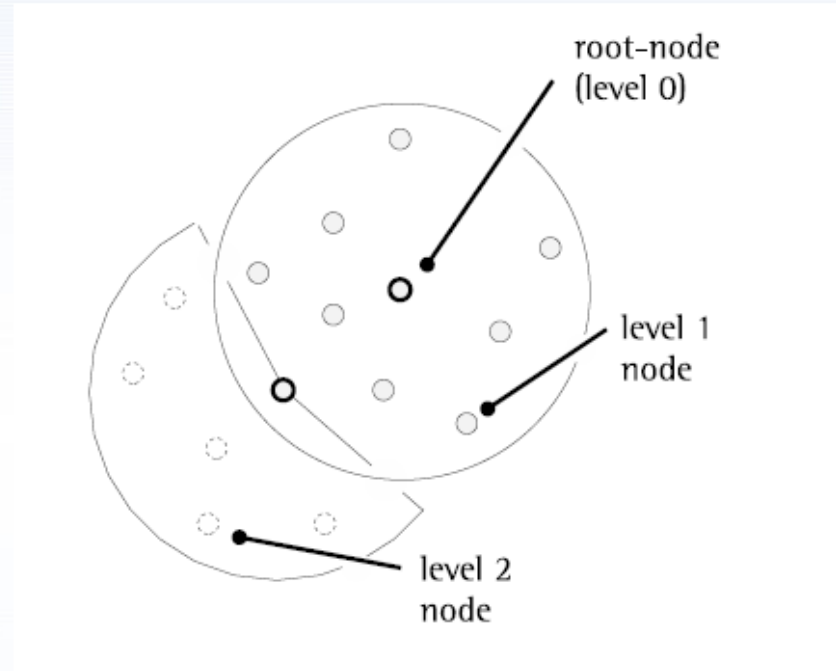
$$\Delta = \frac{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)}{2}$$





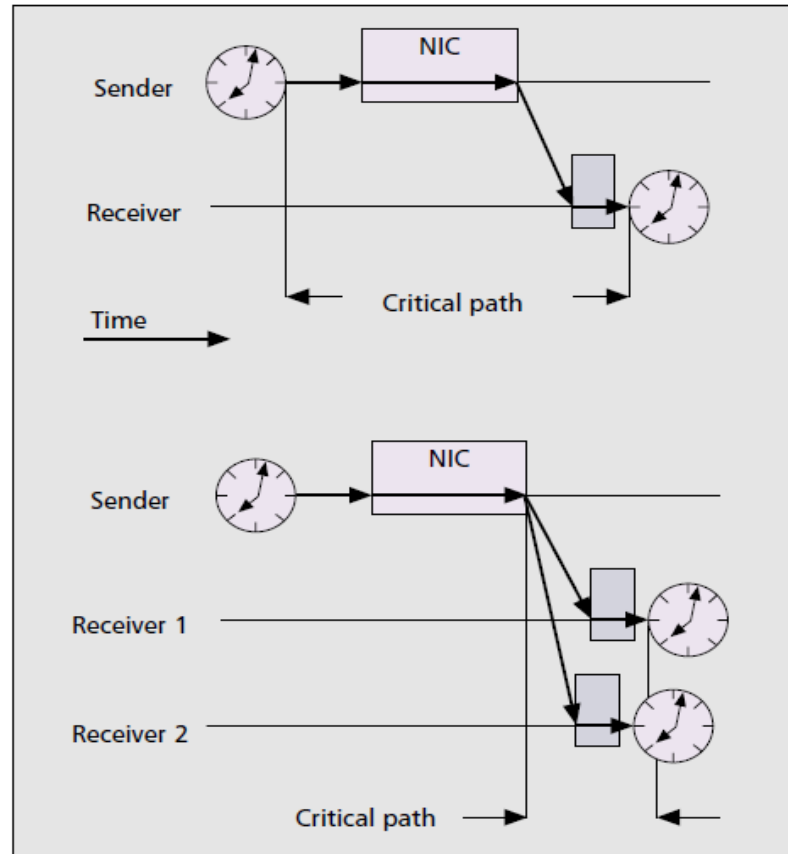
# FTSP

- 泛洪式扩散，全网周期性发送时间同步包。
- 节点通过时间同步层次号来进行反应，时间同步每传递一次，层次号便加1。节点只对含有高于自己层次号的数据包进行同步。
- 网络的冗余性较好，并且考虑了多跳的场景，但泛洪代价较大。





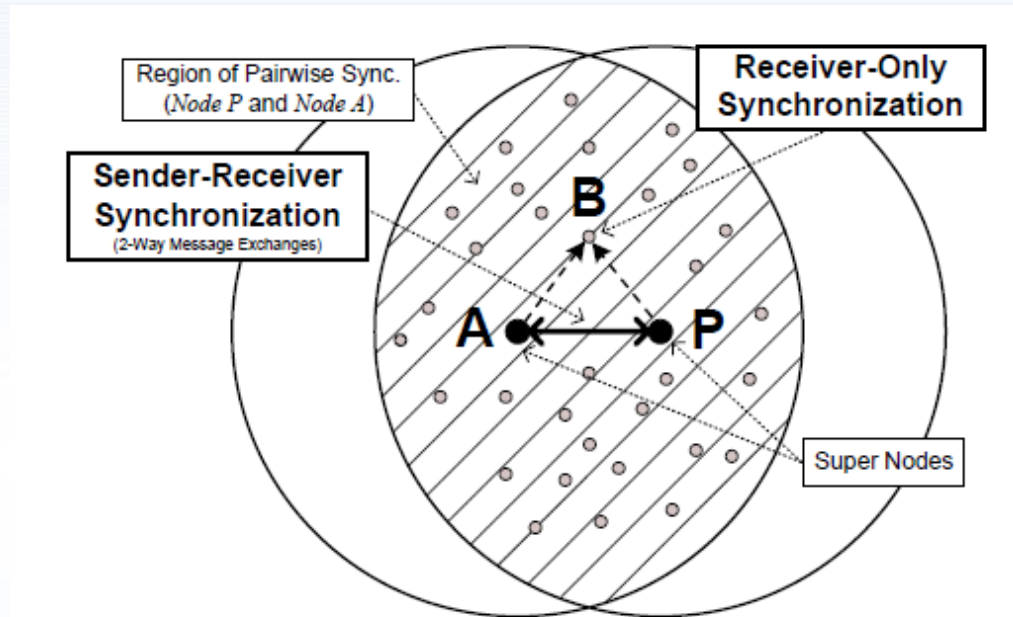
# RBS



RBS与传统方法相比，消除了发送方所带来的误差。



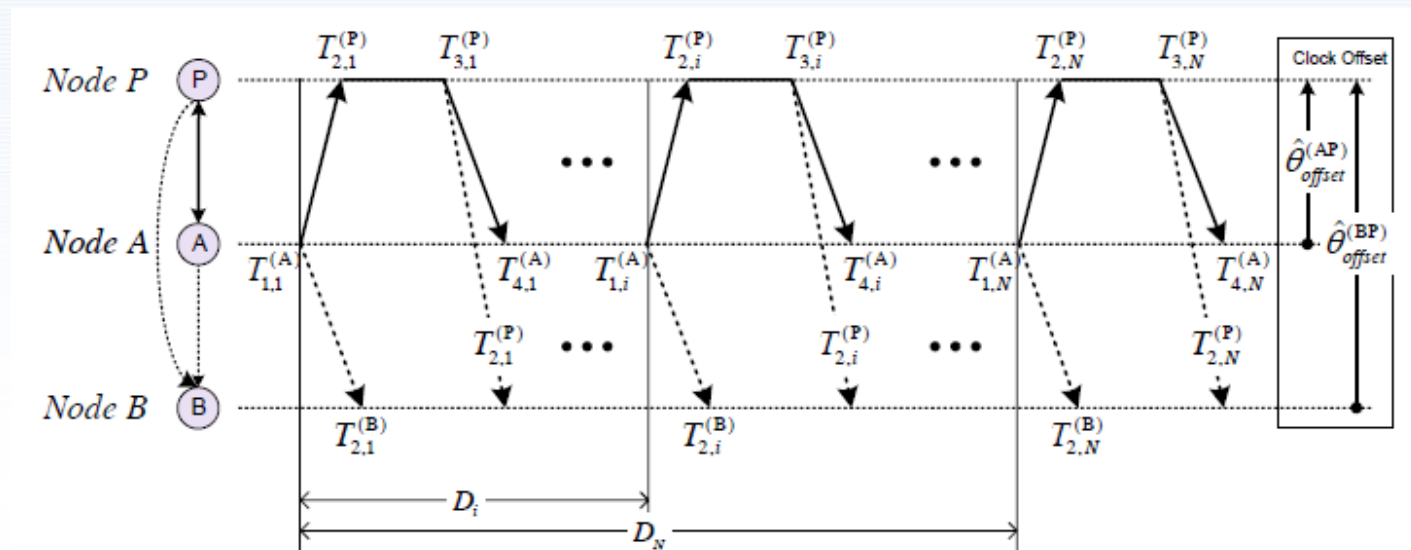
# PBS—模型



- P为参考时间源节点，A是待同步节点，B是位于两者覆盖范围内的其他节点，B也待同步。
- A和P之间进行点对点同步，B通过监听A和P发出的同步数据包，不需要发送任何信息，也能实现与P的同步。



# PBS—主同步算法1



对于A和P，有：

$$\begin{aligned} T_{2,i}^{(P)} &= T_{1,i}^{(A)} + \theta_{offset}^{(AP)} + d^{(AP)} + X_i^{(AP)}, \\ T_{4,i}^{(A)} &= T_{3,i}^{(P)} + \theta_{offset}^{(PA)} + d^{(PA)} + X_i^{(PA)}, \end{aligned} \quad \theta_{offset}^{(PA)} = -\theta_{offset}^{(AP)}$$

●  $\theta$ 是时钟偏移， $d$ 是确定性时延， $X$ 是随机时延。 $X$ 可为为指数型随机变量或高斯随机变量，这里假设 $X$ 服从正态分布。



# PBS—主同步算法2

利用最大似然估计算法可得到：

$$\hat{\theta}_{offset}^{(AP)} = \frac{\bar{U} - \bar{V}}{2},$$

其中，

$$U_i \triangleq T_{2,i}^{(P)} - T_{1,i}^{(A)} \quad V_i \triangleq T_{4,i}^{(A)} - T_{3,i}^{(P)}$$

$$\bar{U} = \sum_{i=1}^N [T_{2,i}^{(P)} - T_{1,i}^{(A)}] / N$$

$$\bar{V} = \sum_{i=1}^N [T_{4,i}^{(A)} - T_{3,i}^{(P)}] / N$$

U、V是多次观测出的时间差的平均值



# PBS—侦听同步算法

对于侦听的节点B，有：

$$T_{2,i}^{(P)} = T_{1,i}^{(A)} + \theta_{offset}^{(AP)} + \theta_{skew}^{(AP)} \cdot (T_{1,i}^{(A)} - T_{1,1}^{(A)}) + d^{(AP)} + X_i^{(AP)}$$

$$T_{2,i}^{(B)} = T_{1,i}^{(A)} + \theta_{offset}^{(AB)} + \theta_{skew}^{(AB)} \cdot (T_{1,i}^{(A)} - T_{1,1}^{(A)}) + d^{(AB)} + X_i^{(AB)}$$

其中， $\theta$ 是相对时钟偏移度。上述两式相减，可得：

$$\begin{aligned} T_{2,i}^{(P)} - T_{2,i}^{(B)} &= \theta_{offset}^{(BP)} + \theta_{skew}^{(BP)} \cdot (T_{1,i}^{(A)} - T_{1,1}^{(A)}) + d^{(AP)} \\ &\quad - d^{(AB)} + X_i^{(AP)} - X_i^{(AB)}. \end{aligned} \quad ($$

利用上式，通过线性回归技术，可以估计出

$$\begin{bmatrix} \hat{\theta}_{offset}^{(BP)} \\ \hat{\theta}_{skew}^{(BP)} \end{bmatrix}$$

具体估计方法可参见论文：K. L. Noh *et al*, “A New Approach for Time Synchronization in Wireless Sensor Networks: Pairwise Broadcast Synchronization”, *IEEE TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS*, VOL. 7, NO. 9, SEPTEMBER 2008

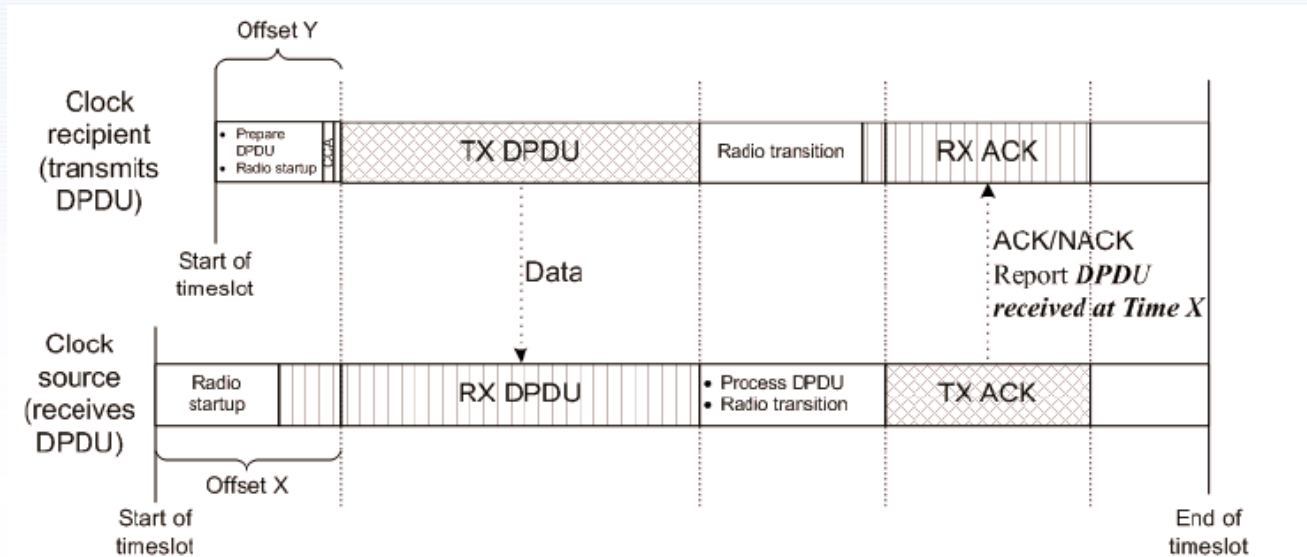


# ISA100时间同步方法

- ISA100采用两级时间同步机制。
  - 第1级：粗同步。通过将时间戳信息附带在广播帧中进行传送。
  - 第2级：精确同步。通过两点之间的数据帧传递进行点点同步。
- ISA100的精确时间同步机制不采用专门的时间同步命令帧，而是捎带在数据帧及其ACK/NACK帧的传递过程中。
- 充分利用了ISA100标准的超帧和时隙机制。因为时隙是按照TAI时间绝对对齐的，因此每个时隙的起始时间是固定的，双方通过计算都可知。



# ISA100精确同步方法

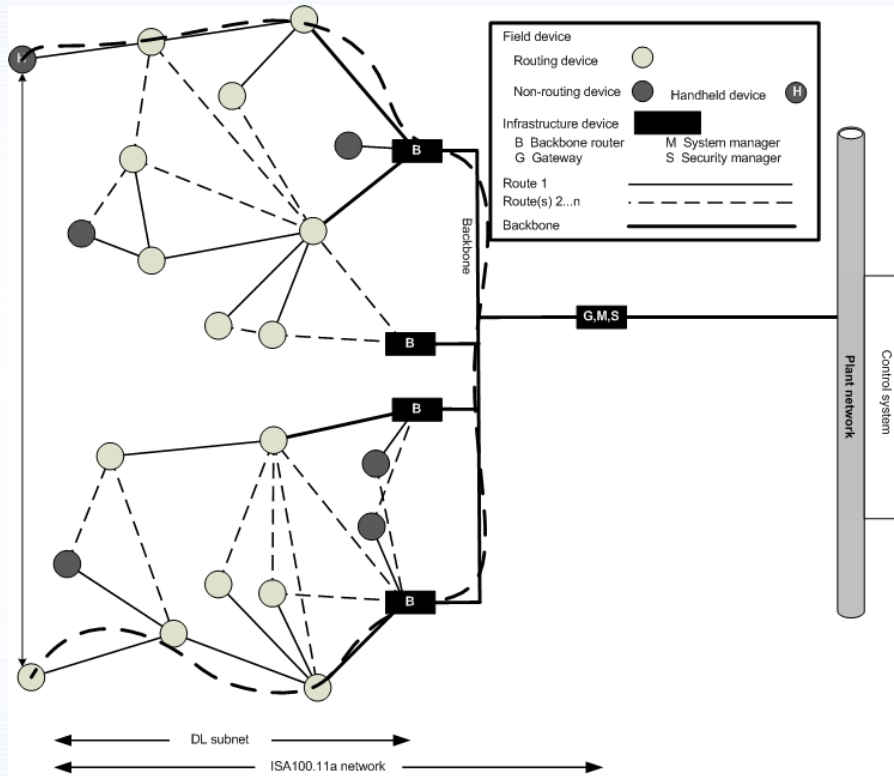


- 发送方在时隙开始处发送数据包，并记录帧的发送时间（SFD）偏移Y，接收方收到SFD后立刻记录自己的当前时间X。X与Y之间的差值便是两者之间的时钟偏移。
- 接收方通过ACK/NACK帧将自己记录的X值附带传递回去，这样发送方便可调整自己的时钟，实现与接收方的同步。





# 网络层



- 采用6LoWPAN标准
- 主要功能
  - 地址转换
  - 分片与重组
  - 骨干网间的路由



# 6LoWPAN概况

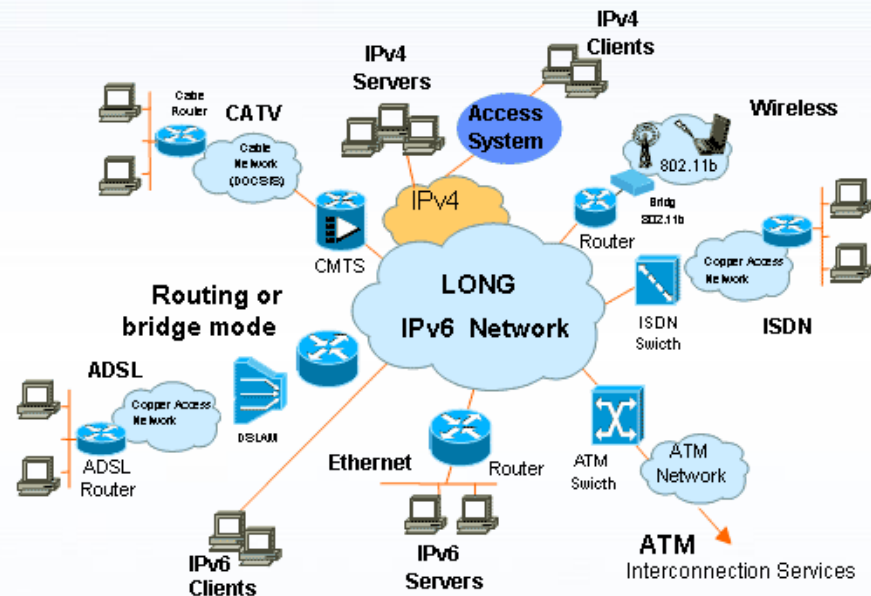
- 6LoWPAN的设计目标是在无线个域网（WPAN）中引入IPv6协议
- 6LoWPAN支持星型、树型、MESH网等多种网络拓扑结构
- IETF关于6LoWPAN已有多项提案
  - RFC4919, RFC4944, draft-ietf-6lowpan-hc, draft-ietf-roll-rpl等
- IPSO组织对6LoWPAN的发展进行推动
  - IPSO的目标是在物联网和各种智能设备中推广IP技术
  - 成员有Atmel, Cisco, Ericsson等





# Why IP?

- IP技术无所不在，采用IP技术更易于与现有网络相连通
- IP技术非常成熟，采用IP技术后可以直接使用大量现有的基于IP的工具、应用程序和服务
- IP技术可以运行在多种物理层上





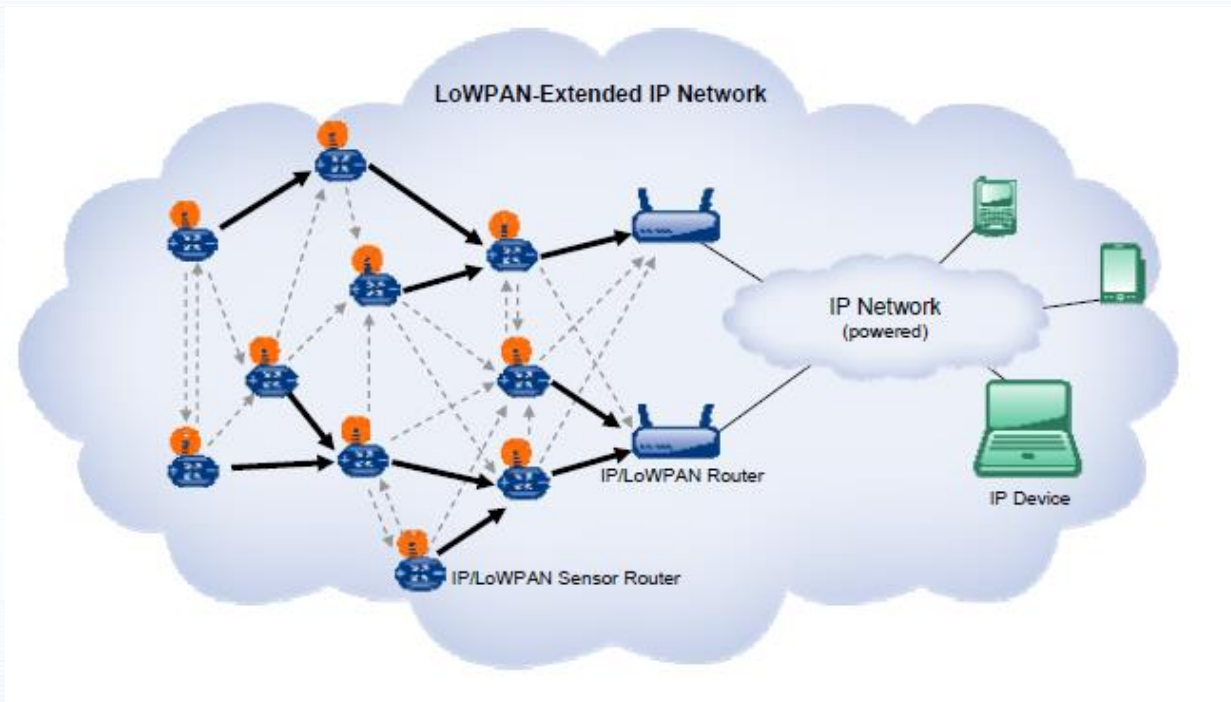
# Why v6?



- 更好更通用的构架
  - 更适合高密度网络
- 更大的地址空间
  - IPv4, 32位, 地址数: 4,294,967,296
  - IPv6, 128位, 地址数:
    - 340,282,366,920,938,463,463,374,607,431,768,211,456
    - (约 $3.4 \times 10^{38}$ )
- 不再需要配置服务器便可组网
  - 不存在DHCP服务器
- 不再需要NAT技术
- 帧头部更容易压缩
  - 6LoWPAN在无线子网内使用压缩地址, 并不是真实的传输128位地址, 一般情况传送的是精简的16位地址



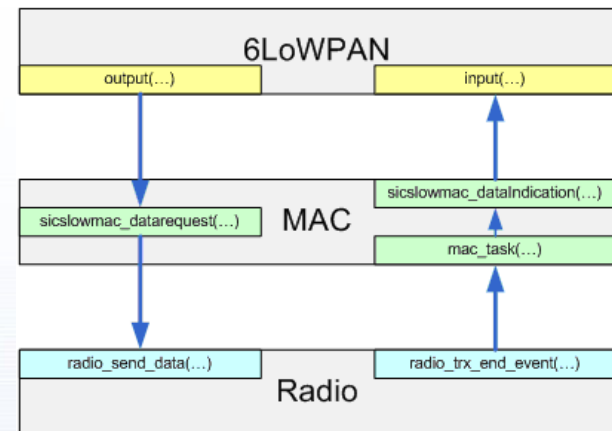
# 全IP网——Internet+物联网





# 专门的6LoWPAN协议栈：uIPv6

- Contiki平台是专门面向无线传感器网络而开发的嵌入式操作系统，开源，免费，可移植到多种平台。
  - C51， TI MSP 430， Atmel AVR
- Contiki平台上具有世界上体积最小的6LoWPAN协议栈：uIPv6。
- uIPv6已经通过了IPV6认证，并且是开源的。
- IPv6部分：仅占用11KB的ROM和1.8 KB的RAM。





# 传输层与应用层

- 传输层采用UDP over IPv6
- 应用层采用基于对象的模型
- 应用支持子层向应用程序提供的服务
  - 对象操作服务 读、写、执行
  - 发布服务 发布
  - 报警服务 发出报警 确认报警
  - 显式隧道服务 隧道



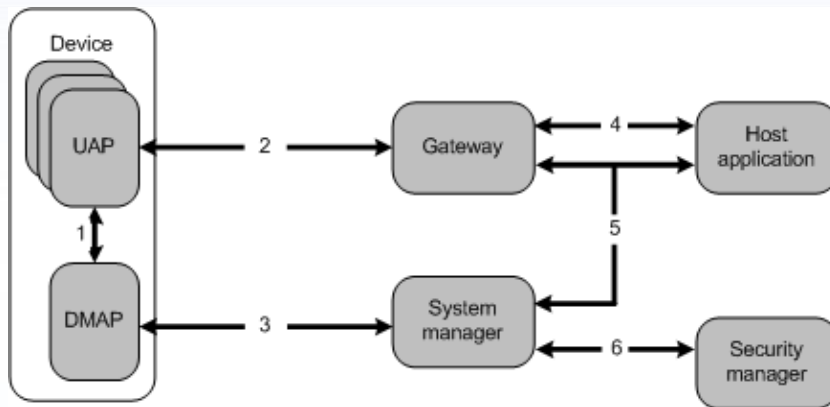
# 网关与安全

- 网关的主要功能
  - 现场设备的数据汇聚点
  - 实现ISA100网络与其他网络的连接，完成协议转换
- 安全机制
  - ISA100.11a是一个高度重视安全的网络
  - DLL层和传输层进行了安全处理





# 系统管理



ISA100.11a管理结构

## 特点

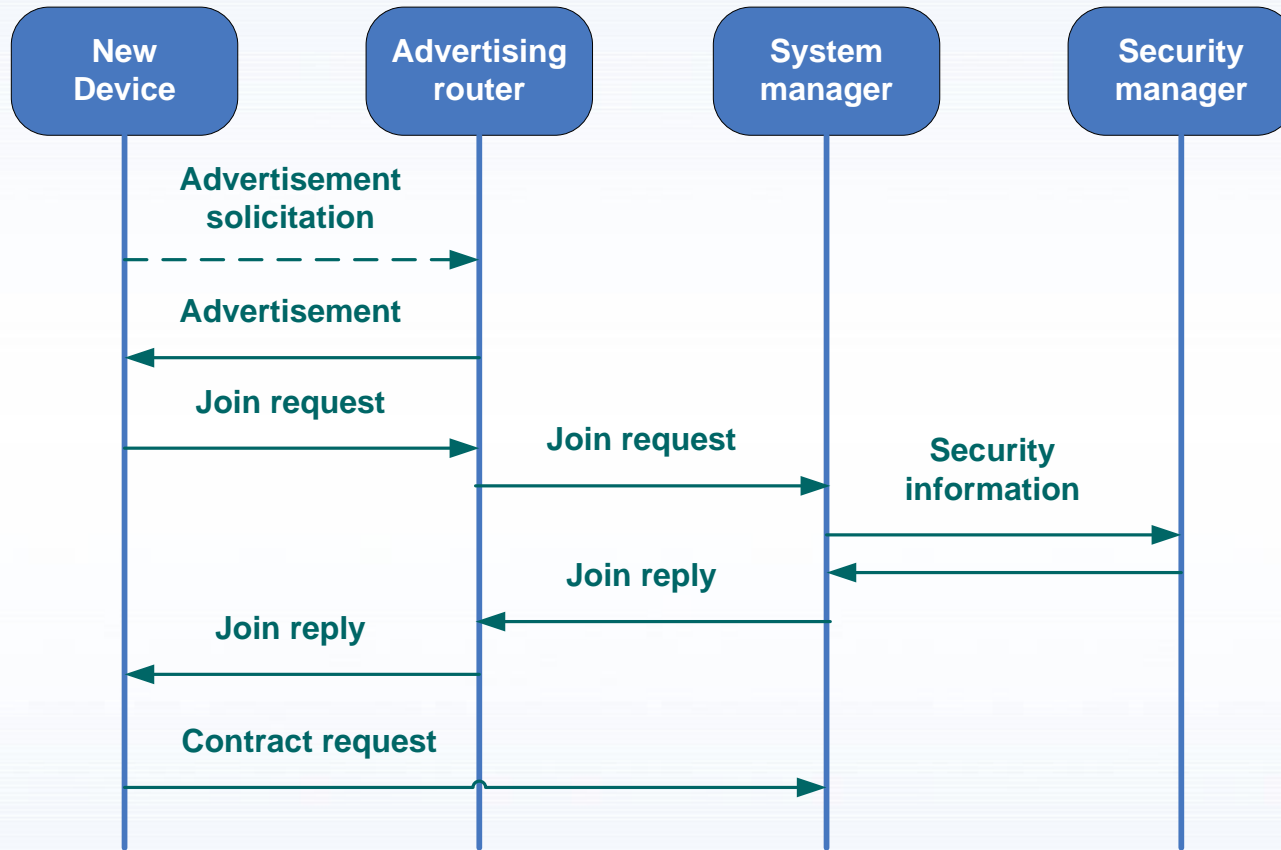
网络加入和脱离

通信资源配置

集中式与分布式管理

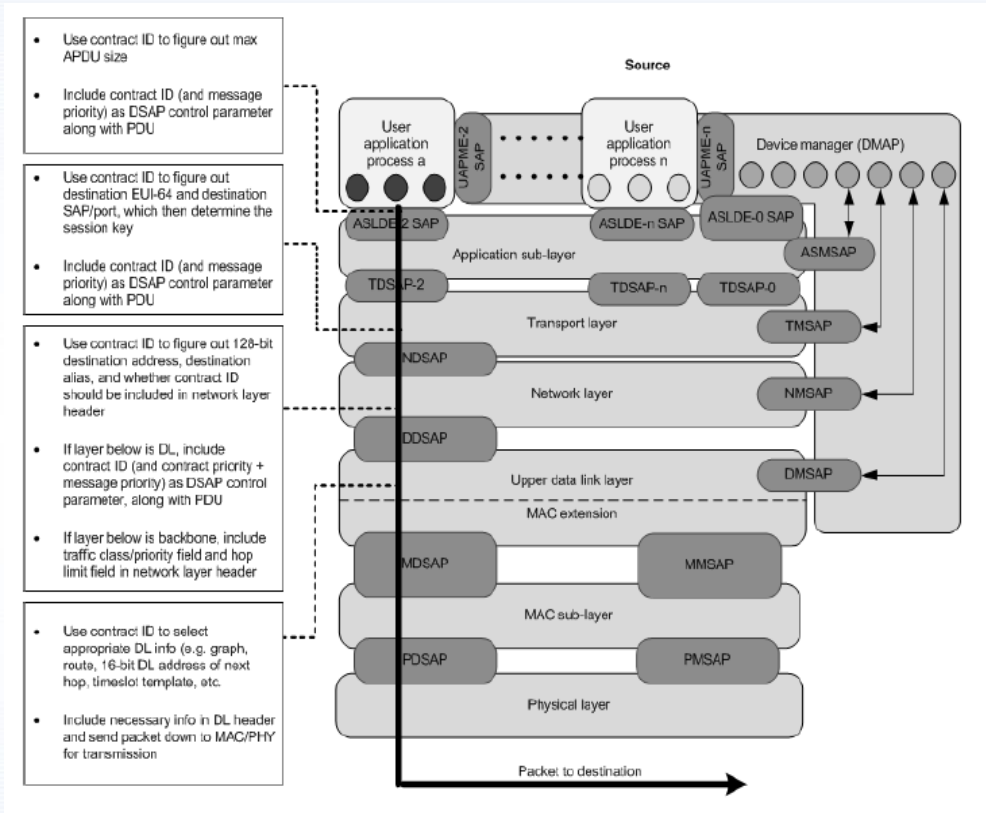


# ISA100设备入网过程





# Contract



- ISA100网络中任意两个节点之间可以建立具有服务质量保证的contract。
- 每个contract可以选择不同的服务类型，系统管理器会对contract的路由、传输时间等进行优化，并对流经的所有节点进行配置。
- Contract是一个跨层的概念，它可以影响节点所有层次的运作。
- Contract是网络为了支持更好的QoS而建立的机制。