



无线传感器网络 ——时间同步技术

重庆邮电大学



主要内容

- 时间同步问题的由来和要求
- 时间同步模型
- 时间同步误差来源
- 经典的时间同步算法
- 信号处理角度的时间同步问题

WSN时间同步问题的由来

- 很多WSN应用需要全网有一个统一的时间度量
 - 例子1：通过对声音传播的感知确定声源位置
 - 例子2：通过位置检测，估计运行目标的速度
 - 例子3：温度传感器采集的数据，需要一个精确的采集时间戳
- 一些网络要维持正常运转，也需要进行时间同步。
 - 例子：采用TDMA型MAC协议的网络，需要进行时隙同步
- 时间同步的需求，可分为相对时间同步和绝对时间同步。
 - 系统的物理时间可通过GPS设备或与网关连接的上位机获得。

WSN时间同步的设计要求

- WSN时间同步需考虑的因素
 - 扩展性
 - 稳定性
 - 鲁棒性
 - 收敛性
 - 能量感知
- WSN时间同步的主要性能参数
 - 最大误差
 - 同步期限
 - 同步范围
 - 可用性
 - 效率
 - 代价和体积

时间同步的原因

- 网络中每个传感器节点都有一个自己的时钟。
- 理想情况下，每个传感器的时钟应该配置为。

$$C(t) = t,$$

t 表示理想时间或参考时间。

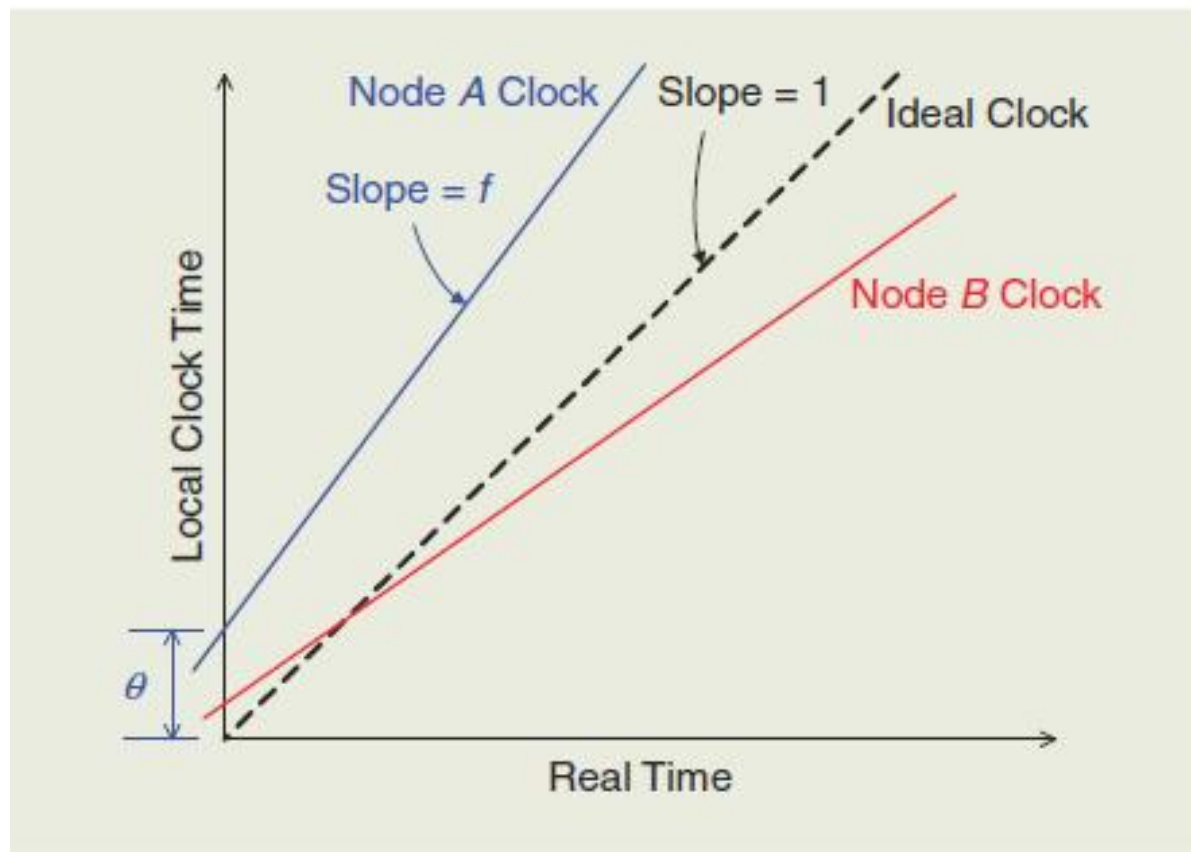
- 但由于时钟晶振的原因，节点的时钟会逐渐漂移。
 - 通常传感器节点的晶振漂移可以达到**40ppm**，即每秒漂移**40**微秒，或每小时漂移**0.144**秒，具体ppt数值与所用元器件有关。
- 所以实际节点的时钟表示为：

$$C_i(t) = \theta + f \cdot t,$$

θ : clock offset (phase difference) 时钟偏移

f : clock skew (frequency difference) 时钟漂移

时钟偏移与时钟漂移



节点间同步模型

- 设有两个节点A和B，则它们之间的同步模型可表示为：

$$C_B(t) = \theta^{AB} + f^{AB} \cdot C_A(t),$$

- θ^{AB} 是相对时钟偏移， f^{AB} 是相对时钟漂移。
- 如果两个节点完全同步（理想状态），则

$$\theta^{AB} = 0 \quad f^{AB} = 1$$

- 若设A为参考节点（时间源），则时间同步的任务是获得（或评估出） θ^{AB} 和 f^{AB} ，使得节点B可以调整自己的时钟与A一致。
- 若网络长期运行，则时钟参数会因环境原因或外部原因发生变化，因此B需要周期性的进行同步，以获取时钟参数。
- 影响晶振变化的因素：温度、大气压力、电压变动、硬件寿命等。

时间同步误差的来源

- 假定在传感网中节点**B**要与节点**A**进行同步。为了完成同步，**A**把自己的当前时间作为消息传递给**B**。如果传递过程没有任何时延，则**B**会立即知道**A**的时间，然后进行调整即可。
- 但实际网络中，该消息的传递过程会受到各种各样的时延影响，使时间同步问题变得复杂。
- 一般情况下，为了估计出相对时钟偏移和时钟漂移，需要同步双方交互一系列的消息。
- 从某种角度来看，**WSN**中的时间同步可以看作是消除时间信息传递中所遇到的随机时延的一个过程。



时延分析 (1)

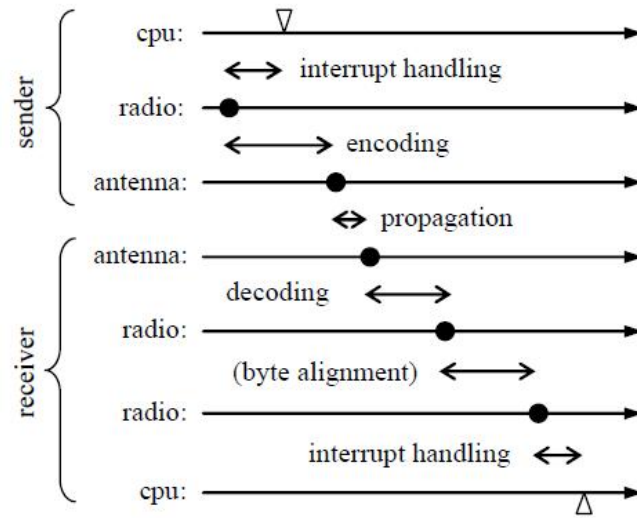
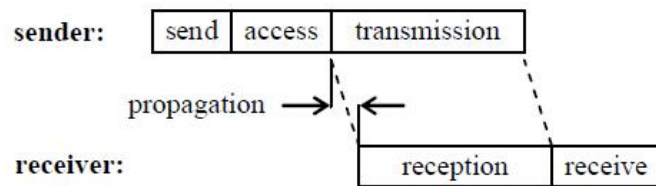


Table 1. The sources of delays in message transmissions

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



时延分析（2）

- 这些时延可以分为两部分：
 - deterministic (fixed portion) 确定时延
 - stochastic (variable portion) 随机时延
- 随机时延与网络的流量、结构、当前状态等密切相关，一般用随机变量对其建模。
- 最常见的模型是把随机时延视为高斯变量，也有视为指数模型的。
- 所以，从信号处理的角度来看，WSN中的时间同步就是随机变量的估计问题。

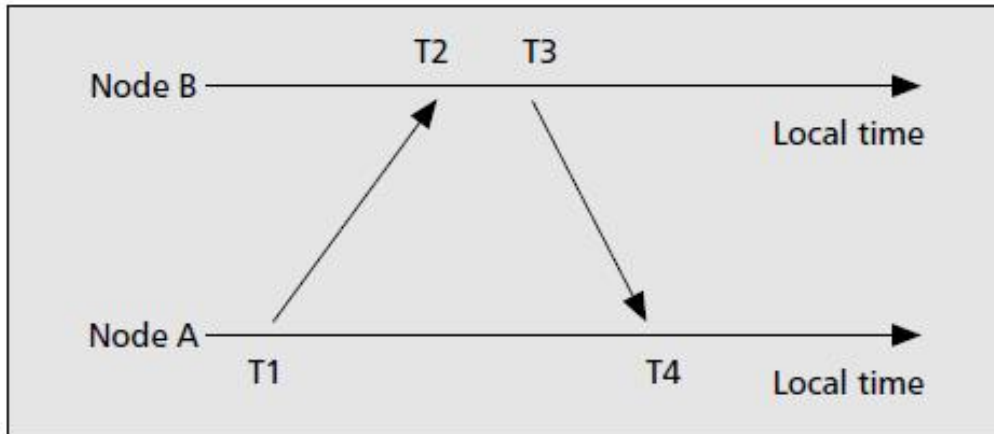


经典时间同步算法

- 经典的WSN时间同步算法有：
 - TPSN（一个发送者，一个接收者，类似NTP）
 - DMTS（利用时间戳，单向同步）
 - 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）
 - tiny-sync/mini-sync（双向同步）



TPSN



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

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

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



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

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



- 现有A、B两个节点，节点B与A进行同步。当B的本地时间到达10点00分00秒的时刻，向A发出了同步请求报文。A在自己的本地时间10点00分20秒收到了B的请求报文，A对收到的请求报文经过20秒的处理时间后向B返回对应的同步应答报文。B收到同步应答报文的本地时刻是10点01分10秒，计算节点A和B之间的真实时间差。



- 现有A、B两个节点，节点B与A进行同步。当B的本地时间到达10点00分00秒的时刻，向A发出了同步请求报文。A在自己的本地时间10点00分20秒收到了B的请求报文，A对收到的请求报文经过20秒的处理时间后向B返回对应的同步应答报文。B收到同步应答报文的本地时刻是10点01分10秒，计算节点A和B之间的真实时间差。

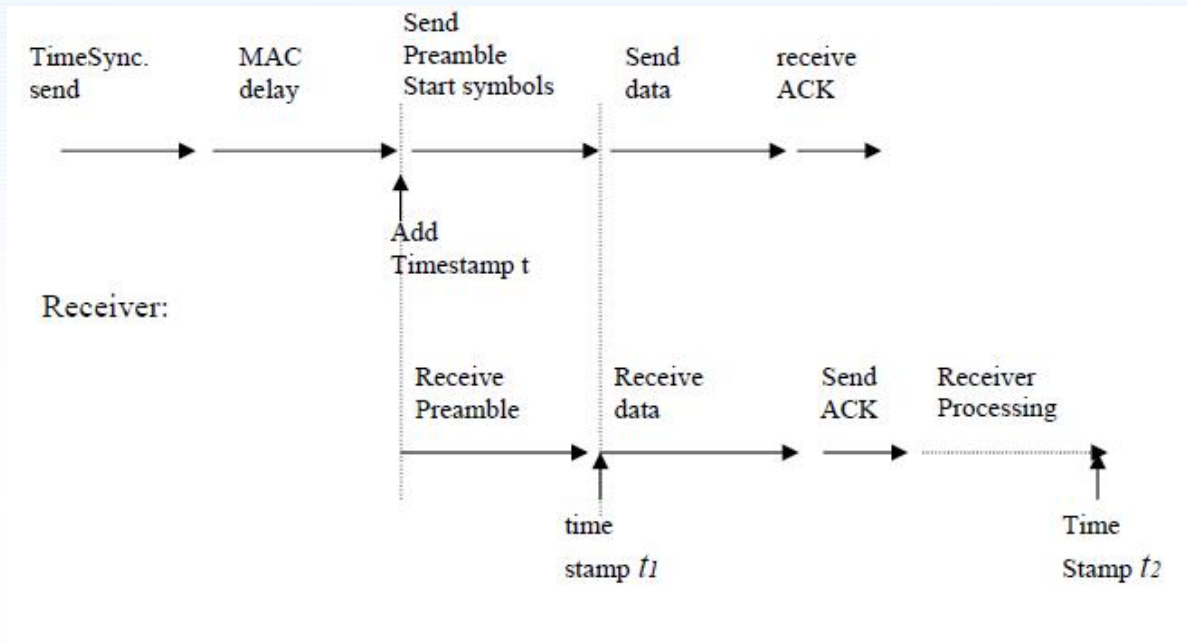
B与A之间的偏移为：

$$\Delta_{A,B} = \frac{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)}{2} = \frac{(20 - 0) - (70 - 40)}{2} = -5s$$

B比A快5s。



DMTS



在 t_2 时利用下式进行时间调整：

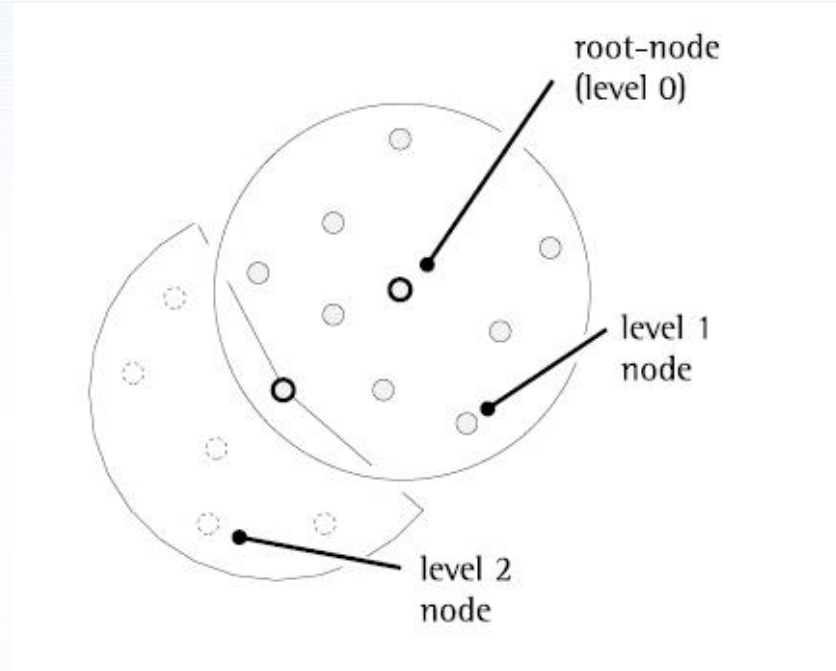
$$t_r = t + n\tau + (t_2 - t_1)$$

- DMTS是一种简捷的利用无线传递时间戳的同步机制，考虑了无线数据包发送的起始和结束过程。
- n 是发送的前导码和起始字符所含的比特数， τ 是发送每个比特所需要的时间（可由传输速率算出）。DMTS未考虑传播时延。



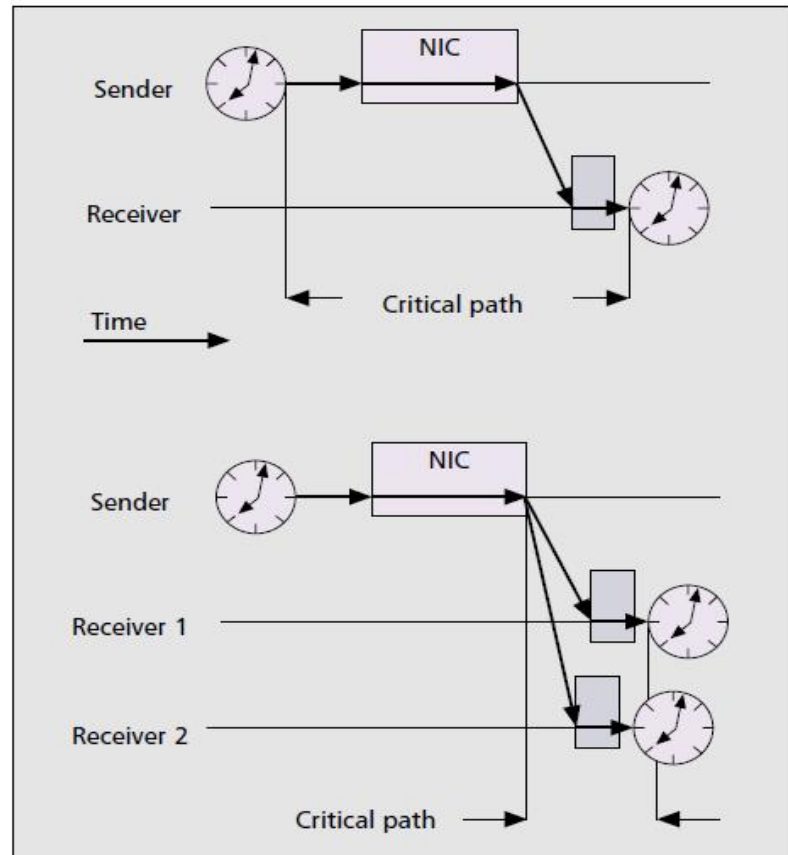
FTSP

- 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。





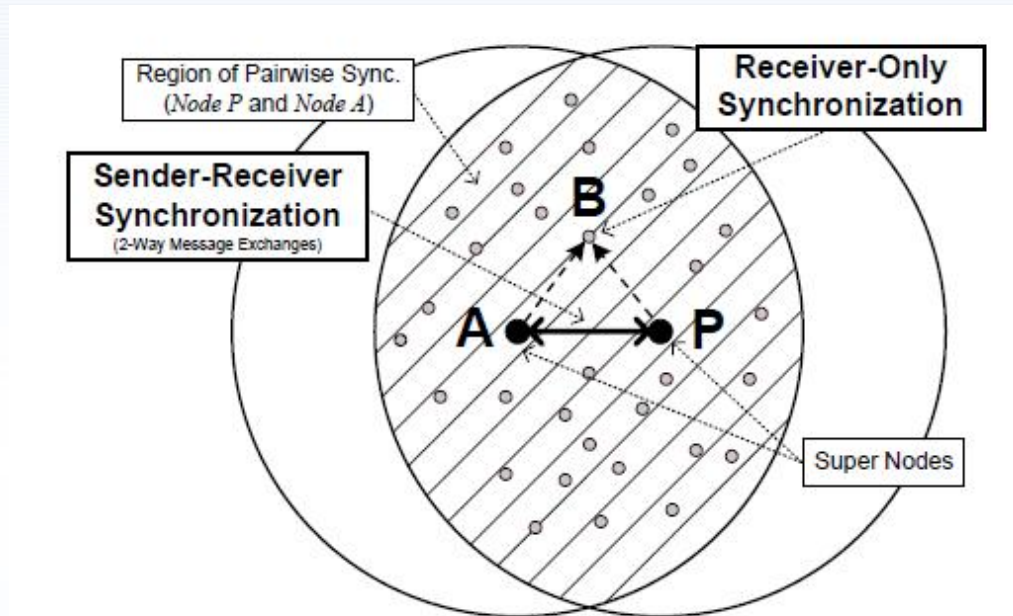
RBS



- RBS与传统方法相比，减轻了发送方所带来的误差。
- RBS还提出了后同步思想，即通常情况下节点无需同步，监测到事件发生后，节点先用其本地事件记录发生时间，接收节点利用RBS同步机制完成时间转换。



PBS

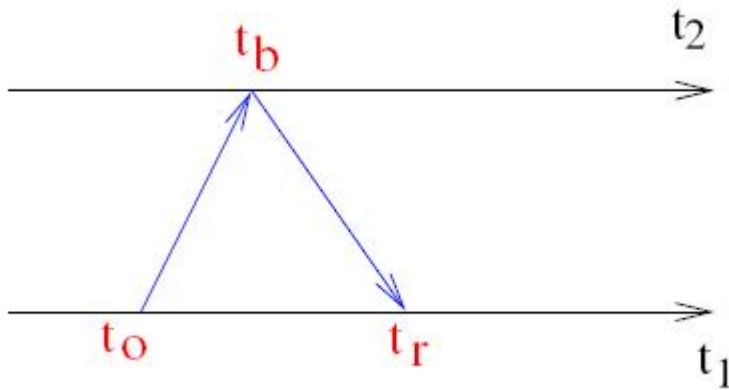


- P为参考时间源节点，A是待同步节点，B是位于两者覆盖范围内的其他节点，B也待同步。
- A和P之间进行点对点同步，B通过监听A和P发出的同步数据包，不需要发送任何信息，也能实现与P的同步。



tiny-sync和mini-sync (1)

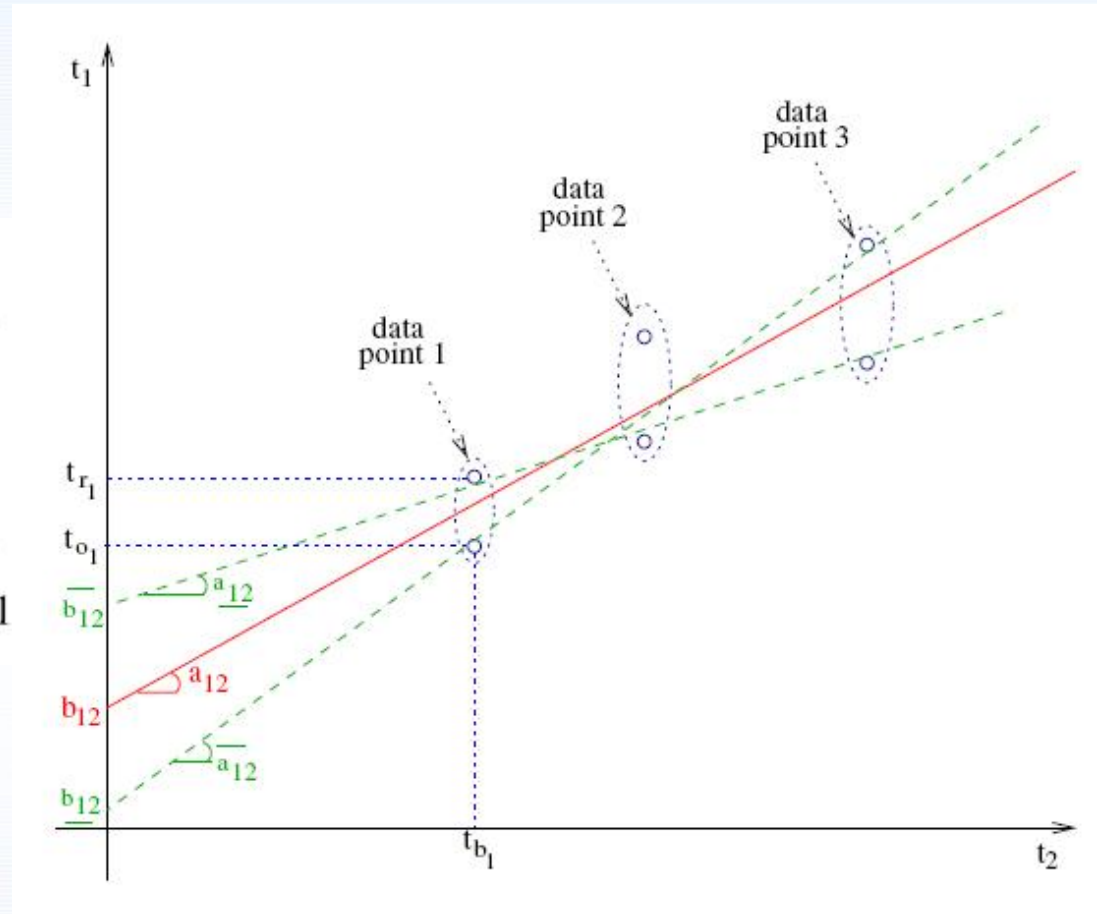
$$t_1(t) = a_{12}t_2(t) + b_{12}$$



t_2 是参考时钟，每次双向同步交互，获得一个由三个时间戳构成的值组合 (t_o, t_b, t_r)

$$t_1(t_o) < a_{12}t_2(t_b) + b_{12}$$

$$t_1(t_r) > a_{12}t_2(t_b) + b_{12}$$



$$\begin{aligned} \underline{a_{12}} &\leq a_{12} \leq \overline{a_{12}}, \\ \underline{b_{12}} &\leq b_{12} \leq \overline{b_{12}}. \end{aligned}$$



tiny-sync和mini-sync (2)

- 为了估计出两个参数，传统方法通常需在采集大量点后，进行线性规划或拟合处理，代价大。
- **tiny-sync**: 通过观察可知，很多数据点可以丢弃，例如前图中的第2组数据点。最少只需要保留4组边界数据点。这样每次获得新的数据点时，与原来的数据点相比较，如果能降低误差，才保留新的数据点。该方法能够达到一定的同步精度，只需要很少的存储量和计算量。
- **mini-sync**: 为了克服tiny-sync在某些情况下会丢失有用的数据点的确定而提出，通过建立约束规则，确保仅丢掉将来不会有用的数据点，并且每次更新数据后都更新约束条件。

参数 a_{12} 和 b_{12} 的估计值可为:

$$\begin{aligned} a_{12} &= \widehat{a_{12}} \pm \frac{\Delta a_{12}}{2}, \\ b_{12} &= \widehat{b_{12}} \pm \frac{\Delta b_{12}}{2}, \end{aligned}$$

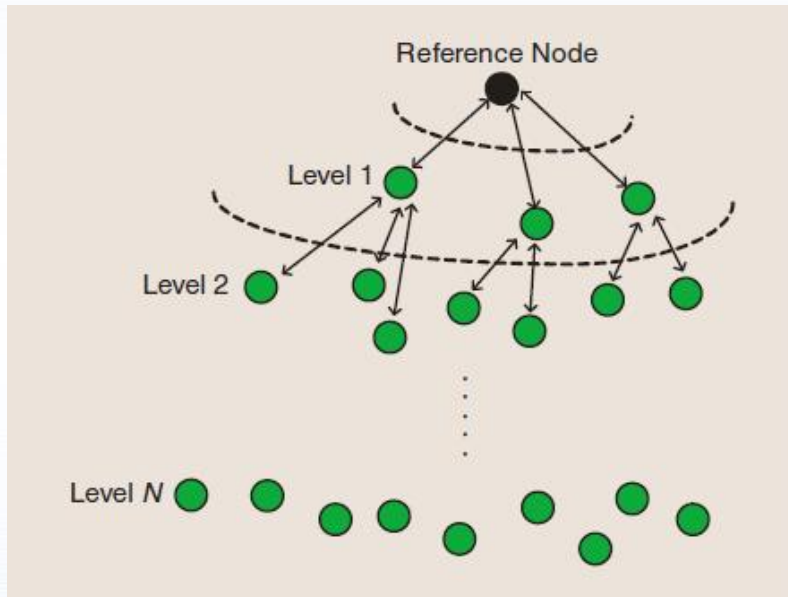
$$\begin{aligned} \widehat{a_{12}} &= \frac{\overline{a_{12}} + \underline{a_{12}}}{2}, \\ \Delta a_{12} &= \overline{a_{12}} - \underline{a_{12}}, \\ \widehat{b_{12}} &= \frac{\overline{b_{12}} + \underline{b_{12}}}{2}, \\ \Delta b_{12} &= \overline{b_{12}} - \underline{b_{12}}. \end{aligned}$$



多跳下的时间同步

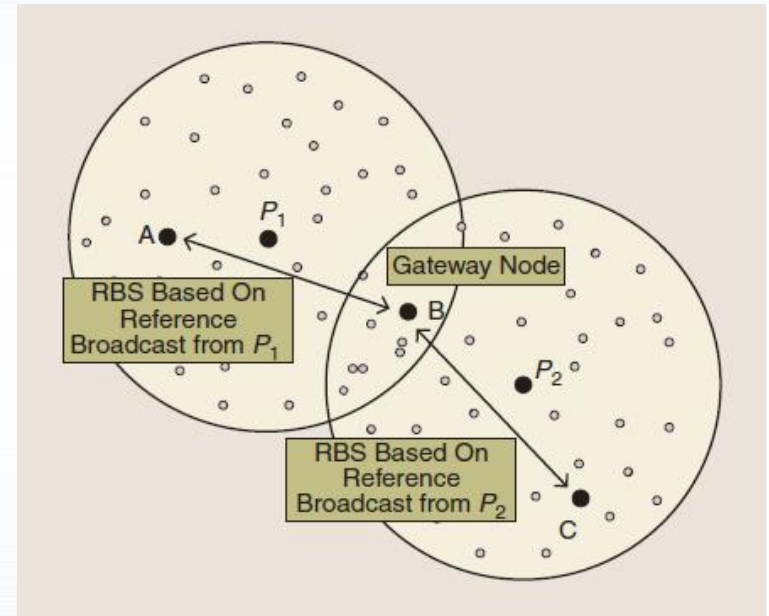
1、逐级同步方式

例如TPSN、FTSP、LTS等



2、中间节点方法

例如RBS、PBS等

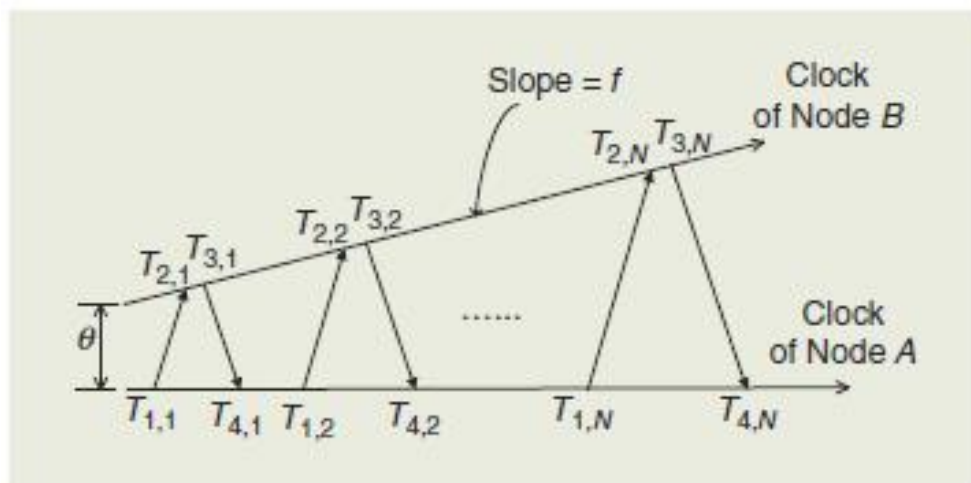


3、全分布式方法 通过局部邻居节点之间的时间信息交换，实现全网的同步，例如**ATS**（平均一致性同步）、**MTS**（最大一致性同步）等

从信号处理角度来看时间同步问题

- 从信号处理角度，可对已有的各种WSN时间同步机制进行分类，并进行统一处理。
- 时间同步机制可总体上分为三类：
 - 双向消息交互类，即发送者-接收者同步。例如 timing-sync protocol for sensor networks (TPSNs), tiny-sync and mini-sync, lightweight time synchronization (LTS)。
 - 单向消息类，例如FTSP，DMTS。
 - 接收者-接收者同步类，例如RBS。

双向消息交互类 (1)



f 是相对时钟漂移;
 θ 是相对时钟偏移;
 τ 是固定时延;
 X_k 是A到B的随机时延;
 Y_k 是B到A的随机时延。

$$T_{2,k} = f(T_{1,k} + \tau + X_k) + \theta,$$

$$T_{3,k} = f(T_{4,k} - \tau - Y_k) + \theta,$$



$$\begin{bmatrix} T_{1,1} \\ \vdots \\ T_{1,N} \\ -T_{4,1} \\ \vdots \\ -T_{4,N} \end{bmatrix} + \tau \cdot \mathbf{1}_{2N} = \begin{bmatrix} T_{2,1} & -1 \\ \vdots & \vdots \\ T_{2,N} & -1 \\ -T_{3,1} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -T_{3,N} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/f \\ \theta/f \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_N \\ Y_1 \\ \vdots \\ Y_N \end{bmatrix},$$

当假设随机时延是高斯变量时,
 可用最大似然估计等信号处理
 方法来估计漂移和偏移。

双向信息交互类（2）

当忽略漂移而只考虑偏移时，可简化为

$$U_k = \tau + \theta + X_k,$$

$$V_k = \tau - \theta + Y_k,$$

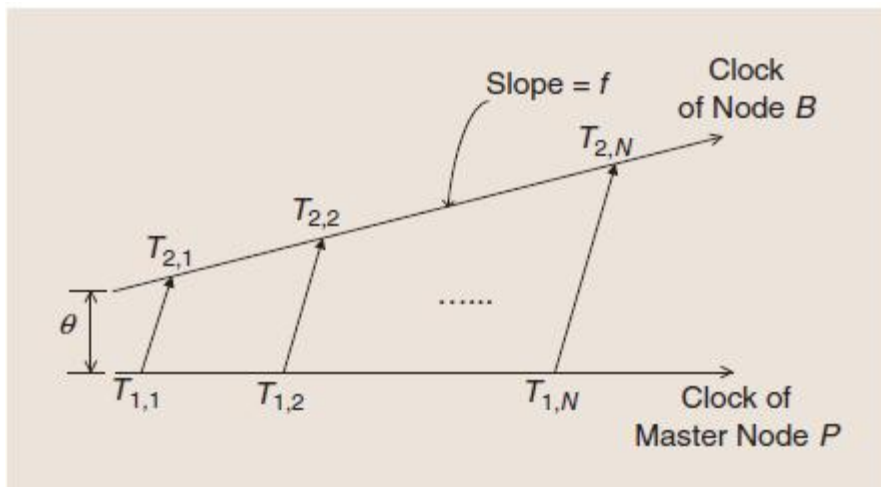
其中， $V_k := T_{4,k} - T_{3,k}$ ， $U_k := T_{2,k} - T_{1,k}$

采用最大似然估计，可得到对时钟偏移的估计为：

$$\hat{\theta} = \frac{1}{2N} \sum_{k=1}^N (U_k - V_k)$$

- 可以看出，固定时延 τ 不影响对 θ 的计算；
- 如果只进行一轮交互，即 $N=1$ ，此时最大似然估计的计算结果就是TPSN方法中所采用的公式。

单向消息类



$$T_{2,k} = f(T_{1,k} + \tau + X_k) + \theta.$$



只考虑时钟偏移

$$T_{2,k} = T_{1,k} + \tau + \theta + X_k.$$

注意：仅靠单向同步，无法区分时钟偏移和固定时延。

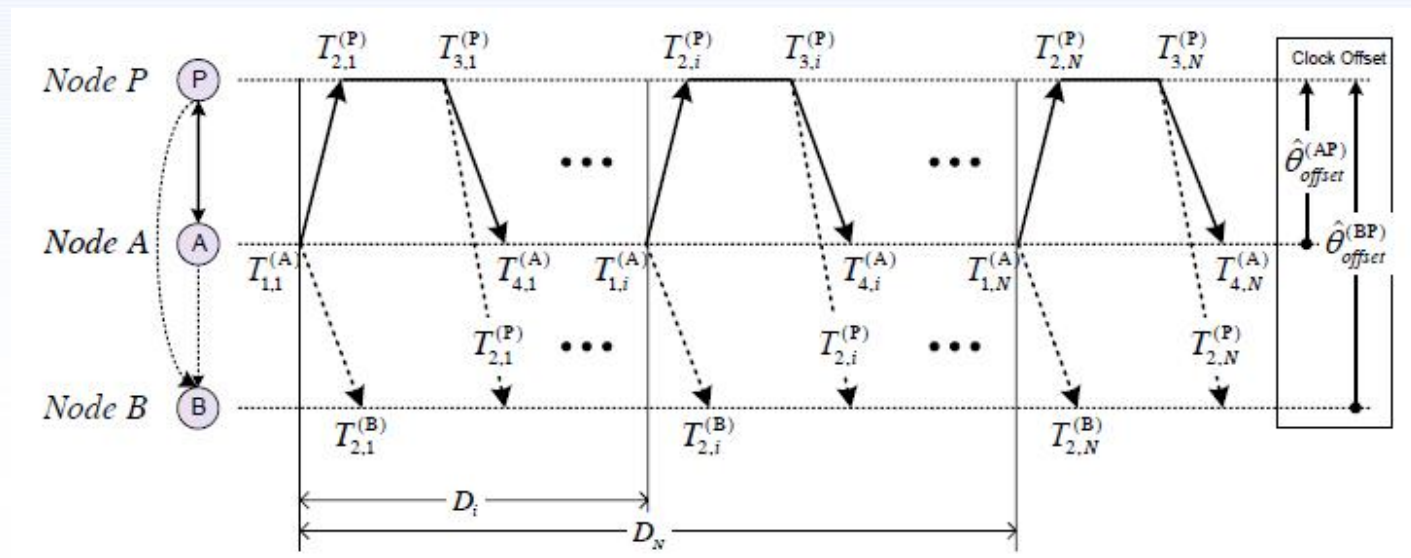
若忽略固定时延，并假设 f 约等于1，则有：

$$T_{2,k} \approx f \cdot T_{1,k} + \theta + X_k.$$

通过多次收集时间戳，便可以得到多个上述式子（方程）。采用最小二乘法（LS）可以估计出 f 和 θ 。这就是FTSP算法中所采用的方法。



实例分析：PBS主同步算法



对于A和P，有：

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

● θ 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。



实例分析：PBS主同步算法（续）

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



实例分析：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， θ_{skew} 是相对时钟偏移度，是减法形式表示的skew，不是之前除法形式的skew（注意两种表示形式的区分）。上述两式相减，可得：

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

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, SEP. 2008

作业

- 现有A、B两个节点，节点B与A进行同步。当B的本地时间到达10点00分00秒的时刻，向A发出了同步请求报文。A在自己的本地时间10点00分20秒收到了B的请求报文，A对收到的请求报文经过20秒的处理时间后向B返回对应的同步应答报文。B收到同步应答报文的本地时刻是10点01分10秒，计算节点A和B之间的真实时间差。

答案

- B与A之间的偏移为：

$$\Delta_{A,B} = \frac{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)}{2} = \frac{(20 - 0) - (70 - 40)}{2} = -5s$$

- B比A快5s。



作业

- P417-419 **12.3 12.16**



Thank you !