

双向报文交换同步的原子性约束与解决^①

徐朝农^② * ** 邓志东 *

(* 清华大学计算机系智能技术与系统国家重点实验室 北京 100084)

(** 中国石油大学计算机科学与技术系 北京 102249)

摘 要 针对经典的双向报文交换同步因存在原子性约束致使应用范围受限的问题,对双向报文变换机制提出了两处改进:对非同步期内由时钟飘移导致的误差进行补偿;对非同步期内由节点时间突变导致的误差进行补偿,从而突破了原子性约束,并结合实际的桥梁健康监测项目背景,针对线状拓扑的无线传感器网络,基于上述两处改进提出了线状传感器网络时间同步协议(TPLSN)。在全局可达智能接点(GAINs)上的实验表明,单跳同步精度可达 $10\mu\text{s}$ 左右,同步误差随跳数的增长率为 $1\mu\text{s}/\text{跳}$;同步一个长度为 n 的线状网络只需 $2n$ 个报文,该值也是全程采用双向报文交换同步机制最少需要的报文数。

关键词 无线传感器网络, 时间同步, 时钟飘移, 时钟同步

0 引 言

本文的工作源于我们承担的桥梁健康监测项目^[1]。为了监测斜拉索桥梁的健康状态,我们设计了一种采用电池供电的振动检测无线传感器网络节点。9 个节点分别附着在一个斜拉索桥梁所选定的 9 根钢索上,另有一个无线通信节点和一台计算机相连并放置在桥头作为基站。每隔 100ms,所有的传感器节点同时采样钢索的振动加速度,并将该信息传输给基站。进一步的信息处理后最终获得对桥梁整体和局部健康状态的评估。为了节约电能,我们采用了固定路由方式,以避免动态路由发现及路由维护等能耗。根据文献[2]的结论,为了提高能量利用率,每个节点只能和其邻居节点直接通信。即整个网络是一个 9 跳的线状拓扑网络。由于信号处理算法的需要,任何两个不同传感器节点在同一采样时刻的真实采样时差不能超过 $50\mu\text{s}$ 。

考虑到时间同步协议的可实现性,我们最终将选择范围限定在洪泛时间同步协议^[3](flooding time synchronization protocol, FTSP)和传感器网络时间同步协议^[4](timing-sync protocol for sensor networks, TPSN)上。FTSP 协议是单向报文同步的典型代表,而 TPSN 协议是双向报文交换同步的典型代表^[5]。文献[4]已

经证明:由于单向报文同步的精度性能对报文传输延迟很敏感,因此对软硬件平台的依赖性很强,只有在可进行精确媒体接入控制(MAC)层时间戳标记的软硬件平台^[6]上才会具有高的同步精度。目前,由于嵌入式操作系统越来越庞大,商用开发平台也较为封闭,因此在实际开发时,MAC 层时间戳往往难以由用户实现,因此单向报文同步方法应用范围有限。与单向报文同步不同,双向报文交换同步对时间戳标记更强调对称性而非精确性,对报文传输延迟不敏感,具有很强的通用性。因此我们决定选用 TPSN 协议。然而,实际试验结果表明 TPSN 协议的同步误差随着网络跳数的增加快速增加,不能满足本项目的需求。

本文对双向报文交换同步机制进行了研究,指出双向报文交换同步存在的原子性约束是造成同步精度受限的重要原因。通过对非同步期内由时钟飘移导致的误差进行补偿以及对非同步期内由节点时间突变导致的误差进行补偿这两个途径,突破了原子性约束。结合实际的桥梁健康监测项目背景,针对线状拓扑的无线传感器网络,基于所提出的突破策略提出了线状传感器网络时间同步协议(timing-sync protocol for linear sensor Networks, TPLSN)协议,在全局可达智能接点(global accessible intelligent nodes, GAINs)节点上的实验表明, TPLSN 的单跳同步精度可

① 863 计划(2006AA04Z208, 2006AA040102, 2007AA041702, 2009AA01Z126), 中国博士后科学基金(20080430412)和国家自然科学基金(90820305、60621062、60775040、60803159), 资助项目。

② 男, 1975 年生, 博士; 研究方向: 无线传感器网络, 嵌入式系统; 联系人, E-mail: xuchaonong@cup.edu.cn (收稿日期: 2009-03-20)

达 $10\mu s$ 左右,同步误差随跳数的增长率为 $1\mu s/\text{跳}$,同步一个长度为 n 的线状网络只需 $2n$ 个报文,该值也是全程采用双向报文交换同步机制最少需要的报文数。

1 术语

时间、频率:每个节点拥有一个由晶体振荡器驱动的计时设备。当实时时间为 t 时其晶体振荡器的频率记为 $f(t)$,而对应的本地时间记为 $c(t)$ 。显然, $f(t) = dc(t)/dt$ 。对于具体的某个节点,例如节点 A ,为表示方便,其晶体振荡器的频率记为 $f_A(t)$,本地时间记为 $c_A(t)$ 。

时间偏移(time offset)、同步误差(synchronization error)、全局时间偏移(global time offset)、全局同步误差(global synchronization error):节点间的本地时间之差称为时间偏移,例如,节点 B 相对于节点 A 的时间偏移定义为 $c_A(t) - c_B(t)$;与文献[7]一致,节点 B 和节点 A 之间的同步误差定义为 $abs(c_A(t) - c_B(t))$;如果节点 A 为时间基准节点,则称 $c_A(t) - c_B(t)$ 为全局时间偏移, $abs(c_A(t) - c_B(t))$ 为全局同步误差。

时钟飘移(clock skew)、局部时钟飘移(local clock skew)、全局时钟飘移(global clock skew):节点 B 相对于节点 A 的时钟飘移定义为 $(f_A(t) - f_B(t))/f_B(t)$,记为 $k_{B,A}$ 。在以时间基准节点为根节点的线状拓扑下,若节点 B 的父节点为节点 A ,则 $k_{B,A}$ 也称为节点 B 的局部时钟飘移,而节点相对于时间基准节点的时钟飘移则称为全局时钟飘移。

2 原子性约束与解决方案

2.1 双向报文交换同步的原子性约束

图 1 为双向报文交换同步机制,考虑两个节点:节点 A 和节点 B 。在第 $i-1$ 轮重同步周期时,当节点 B 需要和节点 A 同步时,节点 B 向节点 A 发送一个同步请求报文,当节点 A 接收到该报文时,随即发出一个同步应答报文。4 个相应的收发时刻信息 $c_B(t1^{(i-1)})$ 、 $c_A(t2^{(i-1)})$ 、 $c_A(t3^{(i-1)})$ 和 $c_B(t4^{(i-1)})$ 在被节点 B 获得后,节点 B 可根据式

$$\begin{aligned} \xi(i-1) = & (c_A(t2^{(i-1)}) - c_B(t1^{(i-1)})) \\ & - (c_B(t4^{(i-1)}) - c_A(t3^{(i-1)}))/2 \end{aligned} \tag{1}$$

计算出其相对于节点 A 的时间偏移。节点 B 在其本地时间上加上 $\xi(i-1)$ 后,就达到了和节点 A 之间的瞬时同步。注意: $c_B(t1^{(i-1)})$ 和 $c_B(t4^{(i-1)})$ 用节点 B 的本地时间记录, $c_A(t2^{(i-1)})$ 和 $c_A(t3^{(i-1)})$ 用节点 A 的本地时间记录。

同步期(synchronization period)、非同步期(non-synchronization period):如图 1 所示,一轮重同步周期由同步期和非同步期组成。其中,双向报文交换开始时刻直至同步点时刻称为非同步期,从本轮同步点后直至下轮双向报文交换开始时刻称为同步期。

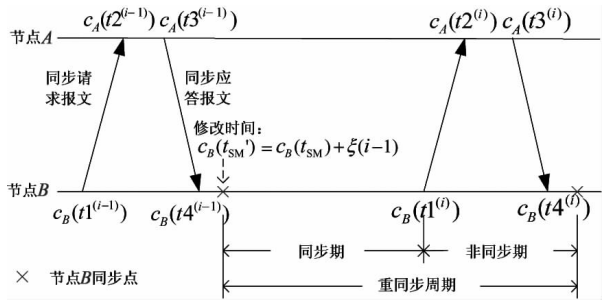


图 1 双向报文交换同步

对于由式(1)所表达的双向同步机制来说, $c_A(t2^{(i-1)}) \approx c_A(t3^{(i-1)})$ 是达到高精度时间同步的必要条件。意即:同步应答在时间上必须紧跟同步请求。我们把这个必要条件称为双向报文交换同步的原子性约束。在实际中,经常出现的两种情况,即:在非同步期内,节点 A 的时间发生突变;非同步期的时间较长,会使得原子性约束被违反。

2.2 原子性约束的解决方案

图 2 示意了原子性约束被违反时的情形。以第 $i-1$ 轮非同步期为例,节点 A 的时间在此期间发生了突变,即时间增加了 $\lambda^{(i-1)}$,此外, $c_A(t2^{(i-1)}) \sim c_A(t3^{(i-1)})$ 的时间较长。这里,为了表述方便,我们仅关注第 $i-1$ 轮重同步周期,因此在图 2 及本段的推导过程中省略了对同步轮数的明确指示。

下面来推导在不满足原子性约束的条件下,在节点 B 同步点时刻的更为准确的时间修正量。与文献[4]的推导过程类似, S_B, R_A 分别代表同步请求报文的发送延迟与接收延迟, S_A, R_B 分别代表同步应答报文的发送延迟与接收延迟, $P_{B \rightarrow A}$ 和 $P_{A \rightarrow B}$ 分别代表同步请求报文和同步应答报文的传播延迟。 $D_{t1}^{B \rightarrow A}$ 代表在实时时刻 $t1$ 时,节点 B 相对于节点 A 的时间偏移。

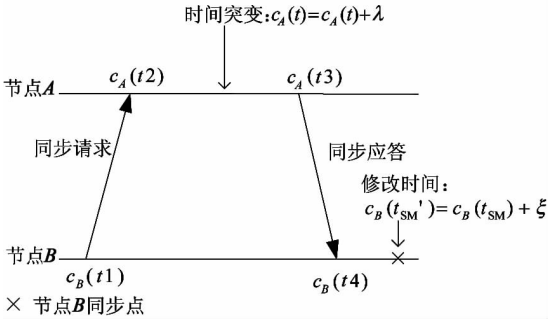


图2 双向报文交换同步的原子性约束

由图2可得

$$c_A(t2) = c_B(t1) + S_B + P_{B \rightarrow A} + R_A + D_{t1}^{B \rightarrow A} \quad (2)$$

$$c_B(t4) = c_A(t3) + S_A + P_{A \rightarrow B} + R_B - D_{t3}^{B \rightarrow A} \quad (3)$$

在节点B的非同步期内,当节点A的本地时间增加 λ 后, $D_{t1}^{B \rightarrow A}$ 可分解为

$$D_{t1}^{B \rightarrow A} = RD_{t1 \rightarrow t3}^{B \rightarrow A} + D_{t3}^{B \rightarrow A} - \lambda \quad (4)$$

其中, $RD_{t1 \rightarrow t3}^{B \rightarrow A}$ 代表在实时时间段 $t1 \sim t3$ 内,由时钟漂移所导致的时间偏移变化量。

由式(2)、式(3),并结合式(4),得

$$\begin{aligned} & ((c_A(t2) - c_B(t1)) - (c_B(t4) - c_A(t3)))/2 \\ &= (S^{UC} + P^{UC} + R^{UC} + RD_{t1 \rightarrow t3}^{B \rightarrow A} - \lambda)/2 + D_{t3}^{B \rightarrow A} \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $S^{UC} = S_B - S_A$, $P^{UC} = P_{B \rightarrow A} - P_{A \rightarrow B}$, $R^{UC} = R_A - R_B$ 。

由于 $D_{t3}^{B \rightarrow A} \approx D_{t4}^{B \rightarrow A} = -D_{t4}^{A \rightarrow B} = c_A(t4) - c_B(t4)$, 以及 $RD_{t1 \rightarrow t3}^{B \rightarrow A} \approx RD_{t1 \rightarrow t4}^{B \rightarrow A}$, 因此有 $((c_A(t2) - c_B(t1)) - (c_B(t4) - c_A(t3)))/2 = (S^{UC} + P^{UC} + R^{UC} + RD_{t1 \rightarrow t3}^{B \rightarrow A} - \lambda)/2 + D_{t4}^{B \rightarrow A}$ 。注意: $D_{t4}^{B \rightarrow A}$ 就是在 $t4$ 时刻节点B相对于节点A的时间偏移,也是我们希望获得的目标。若令

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{(c_A(t2) - c_B(t1)) - (c_B(t4) - c_A(t3))}{2} \\ &\quad - \frac{RD_{t1 \rightarrow t4}^{B \rightarrow A}}{2} + \frac{\lambda}{2} \end{aligned} \quad (6)$$

为节点B在其同步点时刻的时间修正量,则在同步点时刻其相对于节点A的瞬时同步误差为

$$\begin{aligned} Error &= \xi - D_{t4}^{B \rightarrow A} \\ &= (S^{UC} + P^{UC} + R^{UC})/2 \end{aligned} \quad (7)$$

和式(1)相比较,式(6)中增加了两项,其中 $RD_{t1 \rightarrow t4}^{B \rightarrow A}/2$ 项解决了非同步期过长的问题, $\lambda/2$ 项解决了节点A在非同步期内的时间突变问题。这两

个修正项的引入突破了原子性约束。

$RD_{t1 \rightarrow t4}^{B \rightarrow A}$ 可如下计算:

$$\begin{aligned} RD_{t1 \rightarrow t4}^{B \rightarrow A} &= D_{t1}^{B \rightarrow A} - D_{t4}^{B \rightarrow A} + \lambda \\ &= c_A(t1) - c_B(t1) - c_A(t4) + c_B(t4) + \lambda \\ &= (c_B(t4) - c_B(t1))(1 - f_A/f_B) \\ &= -(c_B(t4) - c_B(t1))k_{B,A} \end{aligned}$$

显而易见,对 $RD_{t1 \rightarrow t4}^{B \rightarrow A}$ 的计算要涉及到节点B相对于节点A的时钟漂移量,这在2.3节加以解决。

解决原子性约束不仅可以提高同步精度,而且还可以减少报文的数目。由于同步应答报文无需再紧跟同步请求报文立即返回,而可以推迟到需要的时刻,从而同步应答报文除完成正常的同步应答功能以外,还可以捎带其他信息,并且还可以兼有其他额外作用,从而减少了无线报文的数目。在3.1节的TPLSN协议中可以很清楚地看到该点。

2.3 时钟漂移估计

线性时间模型是目前最为广泛使用的时钟漂移模型^[7]。线性时间模型假设节点间的相对时钟漂移在一段时间内保持固定。基于线性时间模型,我们提出了一个时钟漂移的最小方差无偏估计器。

我们先以没有违背原子性约束时的情况来说明如何进行相对时钟漂移估计。令 $\overline{T_A(i)} = c_A(t3^{(i)}) - c_A(t3^{(i-1)})$, $\overline{T_B(i)} = c_B(t4^{(i)}) - \xi(i-1) - c_B(t4^{(i-1)})$, $e(i) = \overline{T_A(i)} - \overline{T_B(i)}$, 显然, $e(i)$ 是在 $\overline{T_B(i)}$ 时间段内节点B落后节点A的时间。根据线性时间模型, $e(i)$ 可被建模为 $e(i) = k_{B,A} \times \overline{T_B(i)} + w(i)$, 其中, $w(i)$ 为高斯白噪声。

以下方法可估计出 $k_{B,A}$ 。令 $E = (e(1), e(2), \dots, e(n))^T$, $H = (\overline{T_B(1)}, \overline{T_B(2)}, \dots, \overline{T_B(n)})^T$, 根据线性模型的估计理论^[8],通过式

$$\hat{k}_{B,A} = (H^T H)^{-1} H^T E \quad (8)$$

可得出 $k_{B,A}$ 的最小方差无偏估计。

这里, n 为缓冲区的尺寸。需要说明的是,参数 n 在估计器中作用明显:设置过小,采样数不足,导致估计值抖动剧烈;设置过大,估计值不能反映晶体振荡器的短期动态性。此外,在最差情况下,估计器要经过 n 轮计算才可达到估值收敛。文献^[9]经过在Mica2平台^[6]上的测量后,认为8较为合适。第4节的实验也采纳了该值。

当原子性约束被违背时,以图2为例,由于节点A的时间在非同步期内发生了突变,因此 $\overline{T_A(i)}$ 和 $\overline{T_B(i)}$ 的定义略有变化,即:

$$\overline{T_A(i)} = c_A(t3^{(i)}) - c_A(t3^{(i-1)}) - \lambda^{(i-1)}$$

$$\overline{T_B(i)} = c_B(t4^{(i)}) - \xi(i - 1) - c_B(t4^{(i-1)})$$

其中的 $\xi(i - 1)$ 就是式(6),只是把重同步轮数明确表示出来而已。

3 TPLSN 协议

针对桥梁健康监测项目的要求,以解决双向报文交换同步原子性约束的技术为基础,我们设计了针对线状拓扑无线传感器网络的时间同步协议 TPLSN。

3.1 TPLSN 协议原理

为了描述的方便,我们把 10 个监测节点加以编号区分:时间基准节点为节点 0,其下一跳邻居为节点 1,如此顺序编号,直至最后一个节点 9。TPLSN 协议必须在满足项目对同步精度的要求下尽可能降低同步能耗,考虑到可实现性,我们确立了以下三条准则:

- (1) 一轮重同步操作同步网络中所有节点,这称为全网同步。
- (2) 相对于其他节点,离时间基准节点最远的节点的同步误差会首先超限,因此重同步过程应由该节点发起。
- (3) 为达到高精度的全网同步,离时间基准节点越近的节点,其本地时间应该越早被修正,以向其他节点提供更为准确的时间信息。

图 3 描述了 TPLSN 协议的同步过程和时空图。报文前的序号表示报文的发送顺序。每当需要同步时,节点 9 发出一个同步请求报文。其同步路径上的父节点(节点 8)在接收到该报文后,缓存报文中携带的时间信息,并继续向其父节点(节点 7)发送新的同步请求报文。该过程持续进行,直至节点 0 接收到同步请求报文,随后节点 0 立即返回一个同步应答报文。其子节点(节点 1)接收到该报文后,获取其中携带的时间信息,计算出全局时间偏移,修正自己的本地时间和节点 0 同步。节点 1 随后向其子节点(节点 2)发送一个同步应答报文,该报文中携带了与该同步应答报文相对应的同步请求报文的时间信息。该过程持续进行直至节点 9 接收到同步应答报文并修正自己的本地时间为止。由图 3 可见,对每个节点(节点 0 除外)而言,其和其父节点之间有一次双向报文交换同步过程,且该同步过程有如下两个特点:(1)父节点的同步点时刻发生在子节点的非同步期内;(2)对于远离时间基准节点的节点来说,其非同步期持续时间较长。显然,这恰是传统

双向报文交换同步机制由于原子性约束而不能解决的问题。

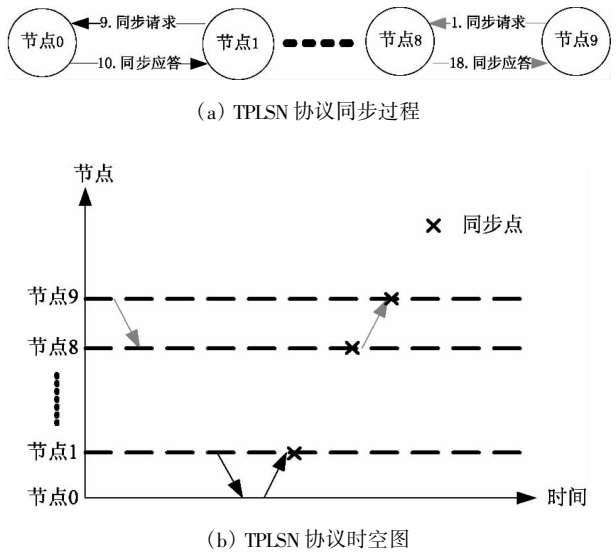


图 3 TPLSN 协议同步过程(a)和 TPLSN 协议时空图(b)

我们来探讨原子性约束被突破后给 TPLSN 协议带来的益处。

以节点 8 为例,节点 8 在接收到由节点 9 发来的同步请求报文后,设想如果原子性约束没有被打破,使得同步应答报文必须紧跟同步请求报文的话,遵照上述三条准则,则可能有以下两种情况:

- (1) 由节点 9 向节点 8 发出同步请求。节点 9 向节点 8 发出同步请求报文后,由于原子性约束的存在,节点 8 必须立即向节点 9 发出同步应答报文。节点 9 根据式(1)计算出其与节点 8 的时间偏移并修正自己的时间,但这种方法显然只能实现和节点 8,而不是和节点 0 之间的高精度同步。从而,为实现节点 9 和节点 0 之间的高精度同步,节点 8 在达到和节点 0 的同步后,还必须立刻发送一个携带其时间修改量的通知报文给节点 9,以通知节点 9 修改其本地时间,来达到和节点 0 同步。
- (2) 由节点 8 向节点 9 发出同步请求。节点 8 向节点 9 发出同步请求报文后,由于原子性约束,节点 9 必须立即向节点 8 发出同步应答报文,从而节点 9 相对于节点 8 的时间偏移只能被节点 8 根据式(1)计算获得,因此即使节点 8 此时已经达到和节点 0 之间的同步,节点 8 也还必须发送一个携带其时间修改量的通知报文,以通知节点 9 立即修改其本地时间,从而达到和节点 0 同步。

显然,上述两种情况对同步精度和同步能耗存在着折中问题:如果实现高精度同步,则每跳至少需

要 3 个报文;如果每跳只有 2 个报文,则不能实现高精度同步。原子性约束的存在是该折中的根本原因。对于 TPLSN 协议来说,由于突破了原子性约束,不仅可实现高精度的同步,而且同步长度为 n 的线状网络只需 $2n$ 个报文,这也是全程使用双向报文交换同步机制最少可能的报文数。也即同时获得了高精度和低能耗。

3.2 全局时钟飘移的估计与补偿

经过 TPLSN 协议同步后,节点在其同步点时刻和时间基准节点之间达到了瞬时同步。而用户获取时间的时刻往往位于同步期内,为获得高精度的时间,必须进行时钟飘移补偿。从而必须获得节点的全局时钟飘移信息。

以节点 I 为例来说明如何获得其全局时钟飘移值。根据全局时钟飘移的定义,有

$$k_{I,0} = \frac{f_0}{f_I} - 1 = \frac{f_0}{f_{I-1}} \times \frac{f_{I-1}}{f_I} - 1$$

$$= \begin{cases} (k_{I-1,0} + 1)(k_{I,I-1} + 1) - 1 & (I \neq 0) \\ 1 & (I = 0) \end{cases}$$

如果 $\hat{k}_{I-1,0}$ 是 $k_{I-1,0}$ 的无偏估计,且 $\hat{k}_{I,I-1}$ 是 $k_{I,I-1}$ 的无偏估计,则

$$\hat{k}_{I,0} = (\hat{k}_{I-1,0} + 1)(\hat{k}_{I,I-1} + 1) - 1 \quad (9)$$

是 $k_{I,0}$ 的无偏估计。

该迭代过程在 TPLSN 协议中易于实现。从时间基准节点开始,每个节点只要把其全局时钟飘移捎带在发送给其子节点的同步应答报文中即可。子节点根据式(8)计算出其局部时钟飘移后,根据式(9)即可计算出其全局时钟飘移。

在获得了全局时钟飘移后,时钟飘移补偿则易于进行。以图 2 中的节点 B 进行说明。设第 $i-1$ 轮同步点时刻之前节点 B 的时间为 $c_B(t_{SM})$,同步点时刻之后节点 B 的时间为 $c_B(t'_{SM})$,当节点 B 的本地时刻为 $c_B(t)$ 时($t'_{SM} < t < t4^{(i)}$),按照线性时间模型,在时钟飘移补偿后,节点 B 的时间实际为

$$c_B(t) \leftarrow c_B(t) + \hat{k}_{B,A}((c_B(t) - c_B(t'_{SM}) + (c_B(t_{SM}) - c_B(t4^{(i-1)})))$$

$$= c_B(t) + \hat{k}_{B,A}((c_B(t) - \xi(i-1) - c_B(t4^{(i-1)}))) \quad (10)$$

3.3 重同步周期的确定

设定定的最大同步误差为 $E_{\max}$,而双向报文交换同步最大可能的同步误差为 $\delta_{\max}$ (可通过实验测得),晶体振荡器的最大频率偏移为 $k_{\max}$ 。若 $\hat{k}$ 为发起重同步操作的节点的全局时钟飘移,则重同步周期 $\bar{T}$ 可按式

$$\bar{T} \leq \frac{E_{\max} - \delta_{\max}}{k_{\max} - \text{abs}(\hat{k})}$$

确定。可以看出,节点的实际时钟飘移越接近最大时钟飘移,则重同步周期越大,同步能耗也越低。反之亦然。

4 实验

对于 TPLSN 协议来说,任意时刻的同步误差为同步点处的同步误差与同步期内由时钟飘移引起的同步误差之和,因此我们对 TPLSN 协议同步点处的同步误差和同步期内的由时钟飘移引起的同步误差分别进行实验研究。我们首先研究了同步点处同步误差与跳数的关系,以了解 TPLSN 协议在多跳线性网络下同步误差随跳数的增长特性。此后,我们进一步研究了同步期内同步误差的增长特性,也即同步期内同步误差与重同步周期的关系。

我们采用了 GAINs 作为实验平台。能否精确地测量出两个节点之间的时间偏移决定着实验的成败。显而易见,对于两个独立节点之间的时间偏移的测量,难点在于如何让节点同时记录下各自的本地时间。我们首创了一个高精度的时间偏移测量方法。具体可参见文献[10]。

4.1 同步点处同步误差与跳数的关系

我们任意选择的 GAINs 为 10 个,节点编号为 0~9,其中节点 0 是时间基准节点。这 10 个节点成线状拓扑展开。通过调整它们的发射功率,形成了一个 9 跳线状网络。每次重同步操作都由节点 9 触发,重同步周期随机选定为 13s。

根据 TPLSN 协议的时空图,节点的同步点在时间上并不重合,因此我们分别在节点 $I(I = 1, \dots, 9)$ 的同步点处测量其与节点 0 之间的时间偏移(即全局时间偏移)。整个实验持续进行了 5h。结果在表 1 中列出。

首先,我们来分析节点在其同步点处的时间偏移与跳数的关系。由表 1 可知,每个节点的全局时钟偏移均值在 0 附近波动,均方差则随节点跳数的增加而增加。但也有两个例外情况:节点 7 和节点 9。原因很明显:由于节点 6 的全局时钟飘移为 -56,而节点 7 的局部时钟飘移为 50,也就是说,节点 6 的计时速率快于时间基准节点,而节点 7 的计时速率慢于节点 6。从数值上来看,这种正负的抵消作用非常明显,使得节点 7 的全局时间偏移的均方差相对

于节点 6 来说反而有所减小。节点 9 的情况与节点 7 类似。此外,对节点 4 来说,虽也存在同样的正负抵消作用,但正负抵消作用过强(注意:由节点 3 的 $1.17\mu\text{s}$ 变化成节点 4 的 $-2.96\mu\text{s}$),因此导致节点 4 的全局时间偏移均方差仍然比节点 3 大。

表 1 同步点处的全局同步误差与全局时间偏移

跳数	节点号	局部时钟漂移(ppm)	全局时钟漂移(ppm)	全局同步误差均值(μs)	全局同步误差均方差(μs)	全局时间偏移均值(μs)	全局时间偏移均方差(μs)	Δ
0	0	0	0	0	0	0	0	
1	1	-51	-51	10.42	6.69	10.34	6.79	3.22%
2	2	-11	-62	9.33	5.31	6.01	8.99	28.2%
3	3	2	-60	9.22	7.01	1.17	11.63	37.1%
4	4	54	-6	10.40	8.26	-2.96	12.93	66.7%
5	5	-45	-51	9.57	9.82	-4.77	12.95	60%
6	6	-4	-56	13.78	11.95	-0.61	18.34	52.2%
7	7	50	-5	13.64	11.68	-8.99	16.36	18.99%
8	8	-46	-51	18.58	16	-8.21	23.29	70.59%
9	9	69	17	19.24	14.30	-8.49	22.58	66.7%

Δ :负时钟偏移采样数/总采样数。

其次,我们来分析节点在其同步点处的同步误差与跳数的关系。由于同步误差是时间偏移的绝对值,因而时间偏移的变化状况决定了同步误差的变化状况。从表 1 可以看出,同步点处同步误差基本上随跳数的增长而增长。单跳同步误差均值为 $10.34\mu\text{s}$,节点 9 的同步误差均值小于 $20\mu\text{s}$,并且同步误差均值随跳数的增长率小于 $1\mu\text{s}/\text{跳}$ 。也就是说,同步点处同步误差随节点跳数增长的速度缓慢。从表 1 最后一列负时间偏移采样数目百分比可以看出,时间偏移有正有负,因此同步点处同步误差随跳数的增长不会呈线性增长^[11]。

我们在相同的平台下实现了 TPSN 协议。在同样的测量条件下,测得单跳平均同步误差为 $14.6\mu\text{s}$,节点 9 的同步误差均值为 $78.5\mu\text{s}$,并且同步误差均值随跳数的增长率约为 $8\mu\text{s}/\text{跳}$ 。这说明,在打破了双向报文交换同步的原子性约束后,无论是单跳还是多跳网络,同步精度均得到大幅提高。

4.2 同步期内同步误差增量与重同步周期关系

无论是在单跳还是在多跳网络下,同步期内同步误差增量与同步周期的关系完全相同,因此只要在两个节点上进行实验就足够了。

我们任意选择了两个 GAINs 节点,事先测得它

们之间的相对时钟飘移为 26ppm。三次实验的重同步周期为分别为 13,26 和 52s(故意设置为倍数关系是为了使实验结果相对直观),每次实验均持续了 5h。时间偏移不是在同步点处采样,而是在同步期内随机采样。具体为:若重同步周期为 $\tilde{T}$,则在节点到达同步点后的 $[1,\tilde{T}-1]$ 秒内随机地对节点时间进行采样。之所以这样做,是为了避开处理器的繁忙期,以获得更加稳定的数据。为了看出时钟飘移补偿的效果,我们还同时实现了未做时钟飘移补偿的 TPLSN 协议,以便更直观地说明时钟飘移补偿的必要性和补偿后的效果。表 2 为实验的结果,每个表格单元包含两个数据,其中前者为未做时钟飘移补偿的 TPLSN 协议的同步误差测量结果(以 TPLSN_N 来代表),后者为做了时钟飘移补偿的 TPLSN 协议的同步误差测量结果(以 TPLSN 来代表)。

表 2 同步期内同步误差与重同步周期的关系

重同步周期(s)	同步误差均值(μs) TPLSN_N /TPLSN	同步误差方差(μs) TPLSN-N /TPLSN	最小同步误差(μs) TPLSN-N /TPLSN	最大同步误差(μs) TPLSN-N /TPLSN
13	366.79 / 10.25	150.50 / 7.01	79.62 / 0.27	614.01 / 29.03
26	717.23 / 10.98	340.32 / 6.33	68.22 / 1.22	1292.45 / 24.55
52	1382.78 / 11.02	695.62 / 6.53	70.42 / 0.0	2159.40 / 35.67

由表 2 可见,在不同重同步周期下,TPLSN 协议的同步误差均值的增量随重同步周期的增长而略有增长。具体为:在未做时钟飘移补偿时,TPLSN 协议的同步误差随重同步周期的增长率为 $25.968\mu\text{s}/\text{s}$,而做了时钟飘移补偿后,相应值则为 $0.017\mu\text{s}/\text{s}$ 。从而意味着节点在达到同步后,可以在很长时间内无须再次进行重同步操作,从而 TPLSN 协议具有极低的同步能耗。

5 结论

原子性约束是使得传统双向报文交换同步机制不能高效扩展到多跳网络中的重要原因。

我们首次指出双向报文交换同步存在着原子性约束,并且原子性约束是造成同步精度和同步能耗性能受限的重要原因。在线性时间模型下,基于我

们提出的时钟飘移估计技术,对传统双向报文交换同步机制进行了两处改进,从而突破了原子性约束。结合实际的桥梁健康监测项目背景,针对线状拓扑的无线传感器网络,基于上述两处改进提出了TPLSN协议。在GAINS节点上的实验表明,单跳同步精度可达 $10\mu\text{s}$ 左右,同步误差随跳数的增长率为 $1\mu\text{s}/\text{跳}$;同步一个长度为 n 的线状网络只需 $2n$ 个报文,该值也是全程采用双向报文交换同步机制最少需要的报文数。

TPLSN协议具有完全的工程实用性,是无线网络时间同步协议的一个优秀的方案,稍加改造就可扩展到非线状拓扑网络中。此外,我们在实验中使用了一些创新性的工程方法,如时间偏移的高效测量方法及高精度浮点数计算技术,这对推进时间同步研究的工程化具有一定的意义。

参考文献

- [1] Sukun K, Pakzad S, Culler D, et al. Health monitoring of civil infrastructures using wireless sensor networks. In: Proceedings of 6th International Conference on Information Processing in Sensor Networks, Cambridge, MA, 2007. 254-263
- [2] Mhatre V, Rosenberg C. Design guidelines for wireless sensor networks: communication, clustering and aggregation. *Ad Hoc Networks*, 2004, 2(1):45-63
- [3] Miklos M, Branislav K, Gyula S, et al. The flooding time

- synchronization protocol. In: Proceedings of the 2nd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Baltimore, USA, 2004. 39-49
- [4] Ganeriwal S, Kumar R, Srivastava M. Timing-sync protocol for sensor networks. In: Proceedings of the 1st ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. LA, USA, 2003. 138-149
- [5] Sivrikaya F, Yener B. Time synchronization in sensor networks: a survey. *IEEE Network Magazine's Special Issue on Ad Hoc Networking: Data Communications & Topology Control*, 2004, 18(4): 45-50
- [6] Hill J, Culler D. Mica: a wireless platform for deeply embedded networks. *IEEE Micro*, 2002, 22(6): 12-24
- [7] Elson J, Girod L, Estrin D. Fine-grained time synchronization using reference broadcasts. In: Proceedings of the 5th Symposium on Operation System Design and Implementation, Boston, USA, 2002. 147-163
- [8] Kay S M. Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory. Upper Saddle River/New Jersey: Prentice-Hall, 1993. 70-105
- [9] Ganeriwal S, Ganesan D, Sim H, et al. Estimating clock uncertainty for efficient duty cycling in sensor networks. In: Proceedings of the Third ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, San Diego, USA, 2005. 130-141
- [10] 徐朝农. 无线传感器网络时间同步技术研究:[博士学位论文]. 北京:中科院计算所,2007. 33-35
- [11] 徐朝农,赵磊,徐勇军等.无线传感器网络时间同步的改进策略.计算机学报,2007,30(4):514-523

Atomicity-caused restriction on two-way packets exchanging synchronization and its resolution

Xu Chaonong, Deng Zhidong

(* State Key Laboratory of Intelligent Technology and Systems,

Department of Computer Science, Tsinghua University, Beijing 100084)

(** Department of Computer Science and Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249)

Abstract

Aiming at the application restriction caused by the atomicity of the classic two-way packets exchanging synchronization scheme, this paper introduces two creative improvements on it as follows: compensating time error during the non-synchronization period caused by clock skew, and compensating time error caused by abrupt time mutation during the non-synchronization period. Combined with a real bridge-health monitoring application and based on the above two improvements, a time synchronization protocol named timing-sync protocol for linear sensor networks (TPLSN) is proposed for wireless sensor networks with linear topology. The experiments on global accessible intelligent nodes(GAINs) reveal that the synchronization error of TPLSN is about 10 microseconds in a single-hop network, and its increase ratio is less than 1 microsecond per hop. To synchronize all nodes in a network with n -hop linear topology, only $2n$ packets are needed in total, which is also the minimum number of packets required by any synchronization protocol that employs the scheme of two-way synchronization on every hop.

Key words: wireless sensor networks, time synchronization, clock skew, clock synchronization