

技术概要

通过网络传输准确的时间是如今电信基础架构的一个关键部分。IEEE 1588（一般称作精密时间协议（PTP））正迅速成为通过分组网络精确传输时间、相位和频率的主要协议。本技术概要论述了时间是怎样通过网络传输的、时间误差是怎样影响网络性能的，以及有哪些方法可以减小时间误差，从而保证整个网络中的准确定时和同步。



时间和时间误差

网络同步指南



目录

1. 什么是时间?	3
1.1 时间和频率	3
1.2 时间的相对性.....	3
2. 时间传输	3
2.1 速度和设置	3
2.2 时间消息	3
2.3 网络协议	4
3. 时间误差	5
3.1 恒定和动态时间误差.....	5
3.2 与时间间隔误差的比较	5
3.3 时钟特性分析.....	6
4. 时间误差的来源	6
4.1 网络时间传输中的误差	6
4.2 时间误差的缓解	7
5. 时间误差预算 (G.8271.1)	8
6. 时间误差的测量	9
6.1 分组接口上时间误差的测量	9
6.2 时戳抖动	9
6.3 恒定时间误差.....	10
6.4 动态时间误差.....	10
6.5 最大绝对时间误差	10
7. 总结	10

1. 什么是时间？

时间是一个基本物理维度——“时空”的第四维度——可以让我们从过去到现在再到将来对事件进行排序。在电子系统中，时间可以让我们将事件排列成一系列步骤，或者在多个设备或功能之间共享资源。为此，我们必须具备测量时间的能力。

1.1 时间和频率

为了测量时间，我们需要对一段固定的时间有一定的概念。其中一般涉及到一个有规律重复的周期性事件。这样就引出了“频率”的概念。历史上以太阳日作为时间推移的主要量度。早期社会还需要具备将一天分成多个部分的能力。例如，埃及人将一天划分为 10 个时刻的白天和开始或结束时 2 个时刻的黄昏。这个定义的问题在于时刻的长度随季节而变，而之后的计时制将时刻（小时）固定为连续两天中午之间的 24 等分。

一些物理现象或多或少地表现出恒定的频率，包括日、年、阴历月等重复的天文现象，以及摆锤运动、石英晶体或铯原子共振等物理现象。这些现象都被用于以某种形式衡量时间的推移。

1.2 时间的相对性

虽然时间本身是一个基本物理维度，但时间的测量是相对的。我们需要知道测量的“起点”或开始时间和进行速度。例如，不同日历采用不同起始事件来确定日期；罗马人从罗马成立之时开始计算年份；公历始于假定的耶稣诞生之时，而伊斯兰历从穆罕默德从麦加逃往麦地那之日计算阴历月。

确定进行速度时需要计算从起始事件开始经过了多少等分的时间。在目前的物理体系中，这个时间单位是秒。这是一个随意性很强的时间单位，但它的好处是目前全世界几乎所有国家都采用它，而且得到了准确的界定。秒最初定义为地球自转一圈所需时间的分数，而国际单位制的最新定义如下：

“秒等于 0K 温度下铯-133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁对应辐射的 9,192,631,770 个周期的持续时间。”

现行的民用和法定时间标准为 UTC（协调世界时），其依据是公历纪元，其进行速度与 TAI（国际原子时）同步。它与 TAI 相差几秒，这是因为地球自转相对于铯原子振荡慢一些。

这提供了一个框架让我们对发生在不同地点的事件进行排序。在移动远程通信中，这些事件可能是两个或以上基站传输帧的起点。有了共同的时间基准之后，就能对这些帧进行协调，避免它们发生重叠并引起传输误差。

2. 时间传输

建立了共同的时间基准之后，有必要知道这个时间基准是怎样传输的，只有这样才能在不同地点测量时间。

2.1 速度和设置

一般对时钟或时间测量装置的速度进行调节（这样它指示的时间就能保持正确的步幅了），然后经过设置与基准时钟匹配。只要它的速度是准确的，那么它就能与基准时钟保持同步了。例如，可以对手表进行调节使之达到正确的速度，然后经过设置与假设精度更高的时钟匹配。后来观察到的手表指示时间可能不同于时钟，这是因为速度调节和 / 或原始设置存在误差。这就是相对于基准时钟的*时间误差*。

2.2 时间消息

在不同地点测量时间的一个途径是在两个地点之间传输一个时钟，并对那里的本地时钟进行调节使之与所传输的时钟匹配。这就引出了从属时钟时钟的概念，即经过调节与另一个时钟（主控时钟时钟）匹配的时钟。由此还形成了时间谱系的概念。

另一种方法是从一个地点发送一条包含时间的消息到另一个地点。为了保证这种方法的效用，还需要知道消息需要多久才能到达。例如，如果我发出一封信其中写到“现在时间正好是中午 12 点”，那么只有收件人准确地知道信件发送的时间这个信息才有用。这样，收件人就能根据传输时间调节自己的时钟与信件上注明的时间匹配了。

估算传输时间的一种方法是发送一条返回消息，这样就能测量“往返时间”了。假设原始消息和返回消息的延时相同，就能估算出这个延时为往返时间的一半。

这是网络时间协议（NTP）或精密时间协议（PTP）等网络时间传输协议所采用的方法。

另一种方法是根据发件人与收件人之间的距离以及消息发送速度来计算。GPS 计时制采用这种方法，即根据消息发送时间、卫星当时的位置和观察者所处的地面位置计算。然后根据无线电波在大气中的传输速度来估计延时。

2.3 网络协议

NTP（网络时间协议，定义于 RFC5905）和 PTP（精密时间协议，定义于 IEEE1588-2008）等网络时间传输协议通过时间消息的交换从一个主控时钟节点向多个从属时钟节点传输时间。

PTP 采用以下四种基本消息，如图 1 所示。NTP 采用相同的原理，不过消息交换协议不同。

- **SYNC 消息**
以正常速度从主控时钟向所有从属时钟传输的消息。包含时戳 t_1 ，用于识别消息从主控时钟传输的时间，从一个称作“起点”的已知时点开始计算，单位为纳秒。大多数 PTP 系统都以时间 1970 年 1 月 1 日 00:00:00 作为起点。
SYNC 消息到达从属时钟的时间用 t_2 表示。
- **FOLLOW_UP 消息**
在每个 SYNC 消息之后传输的消息，包含更精确版本的时戳 t_1 （通过测量物理层的确切传输时间获得）。一些 PTP 时钟能在传输中修改 SYNC 消息中的时戳，因此无需传输 FOLLOW_UP 消息。这些时钟称作“单步时钟”。需要使用 FOLLOW_UP 消息的时钟称作“两步时钟”。
- **DELAY_REQ 消息**
（延时请求）从属时钟发给主控时钟的一种消息，要求主控时钟告知从属时钟消息到达主控时钟的精确时间。它用于计算主控时钟—从属时钟路线的往返时间。
DELAY_REQ 消息的传输时间用 t_3 表示。
- **DELAY_RESP 消息**
（延时响应）主控时钟为了响应 DELAY_REQ 消息而发送给特定从属时钟的消息，包含 DELAY_REQ 消息到达主控时钟的时间 t_4 。

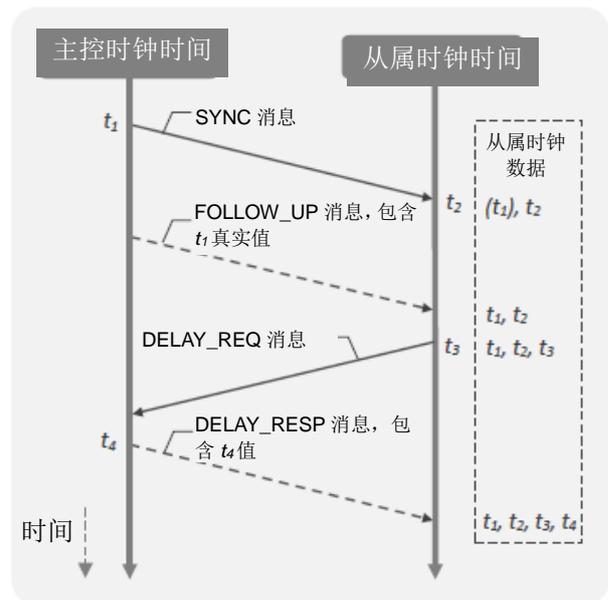


图 1：PTP 消息交换

这些消息产生了 4 个时戳（ t_1 、 t_2 、 t_3 和 t_4 ），如图 1 所示。可以根据它们计算消息从主控时钟到从属时钟再返回主控时钟的往返时间（假设从属时钟的进行速度与主控时钟相似）。然后根据单向网络延时是往返延时的一半这个假设来估计时间偏移，并用它来校正从属时钟时间基准，使之与主控时钟一致。

$$\text{往返延时} = (t_2 - t_1) + (t_4 - t_3)$$

$$\text{单向延时估计} = \text{往返延时} / 2 = (t_2 - t_1) + (t_4 - t_3) / 2$$

$$\begin{aligned} \text{从属时钟时间偏移估计} &= t_2 - (t_1 + \text{单向延时}) \\ &= (t_2 - t_1) - (t_4 - t_3) / 2 \end{aligned}$$

请注意，正向和反向路径长度不同，因此会在时间偏移估计中引入误差。PTP 协议本身无法针对这种不对称对偏移进行校正，但从属时钟有可能根据其他信息推测偏移的大小。这是分组时间协议的一大问题，将在下一节详细论述。

3. 时间误差

时间误差是本地时钟和基准时钟报道的相对于起点时间差值的一个量度。它只是相对的，时间误差如果不与基准进行比较就没有意义。时间误差可能会变化，可以表示为时间函数。例如，如果时钟的速度是错误的，那么时间误差会随着时间的推移逐渐增大，表现为手表因时间误差的逐渐增大而需要每几天调节一次。它也可能随着温度变化及其他随机效应而变。

3.1 恒定和动态时间误差

ITU-T 建议 G.810 采用以下等式为两个时钟之间的时间误差¹提出了一个数学模型：

$$x(t) = x_0 + (y_0 - y_{0,ref})t + \frac{D - D_{ref}}{2}t^2 + \frac{\varphi(t) - \varphi_{ref}(t)}{2\pi\nu_{nom}}$$

式中：

$x(t)$ 是时间误差函数（从属时钟与基准时钟之间的时间差）

x_0 是恒定时间误差（即时间偏移或函数的“DC 分量”）

$y_0 - y_{0,ref}$ 是两个时钟之间的频率偏差

$D - D_{ref}$ 是两个时钟之间的漂移差值（即频率变化率）

$\varphi(t) - \varphi_{ref}(t)$ 是随机相位偏差分量（即动态时间误差）

对于频率或相位锁定到基准的时钟而言，两个时钟之间的频率偏差和漂移变为零，而且主要有两个分量，即恒定时间误差（cTE）和动态时间误差（dTE）：

$$x(t) = x_0 + \frac{\varphi(t) - \varphi_{ref}(t)}{2\pi\nu_{nom}}$$

$$= cTE + dTE$$

如图 2 所示，恒定时间误差（cTE）是时间误差函数的平均水平，即偏移。动态时间误差（dTE）是函数的幅度。最大绝对时间误差 $\max|TE|$ 是两个时钟时间之间的最大差值，即相对于零的最大距离，无论是正的还是负的。

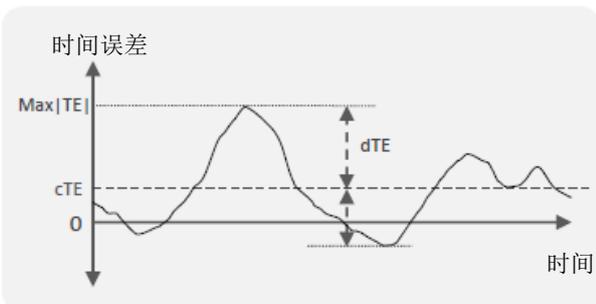


图 2：恒定和动态时间误差（cTE 和 dTE）

3.2 与时间间隔误差的比较

时间误差有时会与时间间隔误差（TIE）混淆。两者之间的差别在于时间误差是相对于起点的时间差值，而 TIE 是一段观测时间间隔内时间误差变化的量度。实际上，它是两个时钟之间相位变化的量度。TIE 及相关指标 MTIE（最大时间间隔误差）用于分析频率时钟内相位漂移的特性。

TIE 一般在测量开始时设为零，而对两个时钟之间在不同观测时间间隔的后续相位变化进行绘图。测量 TIE 时无需起点；起点本质上是测量的开始时间。如果要对图 2 所示同一个时钟的 TIE 进行绘图，那么曲线的形状是相同的，但该函数在测量开始时的数值是零。如图 3 所示：

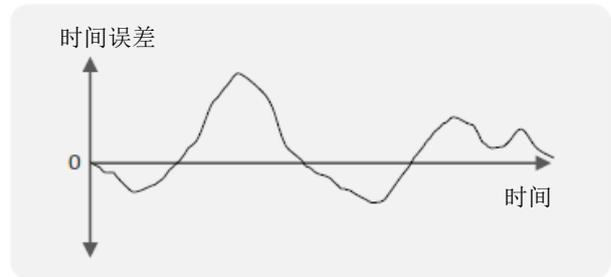


图 3：时间间隔误差

最大时间间隔误差（MTIE）是一段时间间隔内记录的 TIE 最大变化。它往往用于频率时钟信号最大相位变化的限值。对于时钟而言，MTIE 可以用于定义时间误差动态部分的限值。MTIE 值相当于 dTE 的峰峰值。例如，原始基准时钟（PRTC）的 dTE 受 MTIE 时标限值，如图 4 所示。

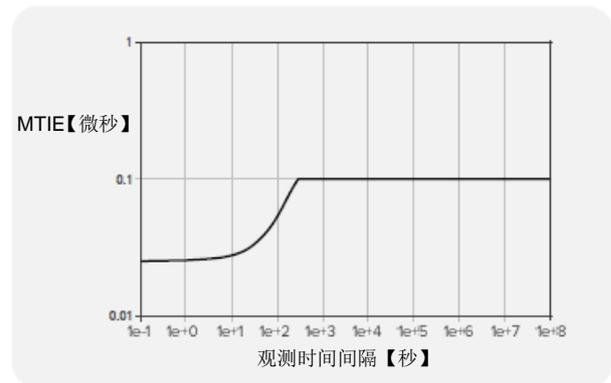


图 4：PRTC 的 MTIE 限值

（G.8272 中的图 1）

3.3 时钟特性分析

一般而言,时钟的性能范围是由三个主要参数界定的:

- **Max|TE|**
时钟与基准之间的最大时间差值。
范围一般指定为不到一秒。
- **cTE**
时钟的平均时间误差。
范围一般指定为不到一秒。
- **dTE**
时钟的时间误差的变化。
范围一般通过 **MTIE** 和 **TDEV** 时标指定。

有时全部三个参数的范围都被指定,但往往仅指定两个参数的范围,即 **max|TE|**和 **dTE**。例如, **G.8272** 中指定的 **PRTC** 只有 **max|TE|**和 **dTE** 的规格。

max|TE|是 **dTE** 和 **cTE** 之和,因此可以推断出 **cTE** 的数值。但一些制造商可能会用较低的 **dTE** 换取较高的 **cTE**,而且仍然符合 **max|TE|**整体数据。

4. 时间误差的来源

时间误差可能有几个来源。例如,时间设置可能存在误差,而这个误差将持续到时钟的下次设置。如果时钟经常设置和复位,那么这会被视为以更新速率变化的随机误差。

速率误差会引起时间误差的逐渐增大,因为时钟相对于基准的时间偏差会越来越大。对于有恒定频率偏差且经常校正的时钟而言,时间误差函数会变为锯齿状,因为调节会使时钟迅速返回正确时间。温度变化和振荡器老化可能会使速率随时间变化,从而导致时间误差的漂移。

4.1 网络时间传输中的误差

NTP 和 **PTP** 等分组网络协议可能会引起恒定和动态时间误差。正向网络延时不同于反向网络延时时会形成恒定时间误差 (**cTE**)。这是因为在没有独立基准的情况下无法直接测量从一个地点到另一个地点的延时。在分组协议中,网络延时被估计为往返延时的一半。如果情况并非如此,那么时间偏移的计算中就会存在误差,从而在从属时钟的时间设置中形成相应的误差。

正向与反向网络延时之间的差值称作“不对称”。分组网络中的不对称有三个主要成因:

- **节点不对称**
每个网络节点(例如交换机或路由器)在各方向上的延时不一定相等。
- **链路不对称**
节点之间链路的延时不一定相等。这可能是由不同长度的光纤或光缆引起的,也可能是同一根光纤以不同波长运行引起的。
- **路由不对称**
分组路由协议并不能保证分组在各方向上选取同一条路由。

如上文所述,无论是 **NTP** 还是 **PTP** 都不能直接解决不对称问题,因为无法由时戳本身来检测或测量不对称。不对称引起的恒定时间误差仍然无法检测,除非通过独立的基准进行测量。但如果能对不对称进行外部测量,那么可以在计算时钟时间偏移时将测量结果作为校正系数。

动态时间误差形成的原因是每个分组在网络中传输的时间不同。这称作分组延时变化 (**PDV**)。 **PDV** 的主要成因是路径上每个交换机或路由器中的队列,例如等待其他分组的发送。将时序分组设置为最高优先级就能缩减队列,但无法消除。

动态时间误差形成的另一个原因是时钟内的本地振荡器。温度变化或老化引起的频率波动会使时钟运行偏快或偏慢,从而形成相对于基准的时间误差。时钟调节时时间误差随之得到校正,但振荡器的稳定性仍是保证从属时钟准确的一个重要因素。

时戳量化也可能会影响时戳本身的精度,从而引起位置和时间抖动。这一点将在第 6.2 节中详细阐述。这个误差的很大一部分可以用低通滤波器消除,但仍有一部分无法消除。

以上问题都会在时钟的时间设置和时钟之间的时间传输这两个方面形成误差。在一连串分组时钟中,恢复时间并将它沿串列传递所形成的误差会引起串列内时间误差的积聚。

4.2 时间误差的缓解

时间传输分组协议包括多种减小时间误差的方法。NTP 描述了对时戳值进行过滤以减小 PDV 对动态时间误差影响的算法²。该算法源于从 1985 年该协议首次发布时起至今近 30 年通过互联网运行 NTP 的经验。

PTP 并未描述算法，而是把这项任务留给实施者完成。它只描述了减小 PDV 影响的两种不同方法，这两种方法都涉及对主控时钟与从属时钟之间路径上的交换机或路由器进行变更：

- **边界时钟（BC）**
终止每个 BC 兼容交换机或路由器处的 PTP 流，从而使其本地时钟与 PTP 主控时钟同步。时钟随后重新生成向下游设备发送的 PTP 消息。
- **透明时钟（TC）**
测量分组经过交换机或路由器所需的时间，并将它加到分组中的校正字段中。从属时钟设备随后为路径中每个 TC 兼容交换机或路由器生成一个延时记录。

应当注意的是，这两种设备都可能存在缺陷，而且会自行引入一定的时间误差。这种“噪声”一般小于 PDV 引起的噪声，但对这些时钟进行特性分析对于评估其是否满足整个系统的目标精度十分重要。

ITU 正在为时间通过 PTP 在网络中的传输定义两个“参数”。第一个参数适用于主控时钟与从属时钟之间路径的每个节点都包含 BC 的情形，称作“全同步支持”。第二个参数适用于普通交换机和路由器与包含 BC 或 TC 的“PTP 感知”设备混合的情形，称作“部分同步支持”。

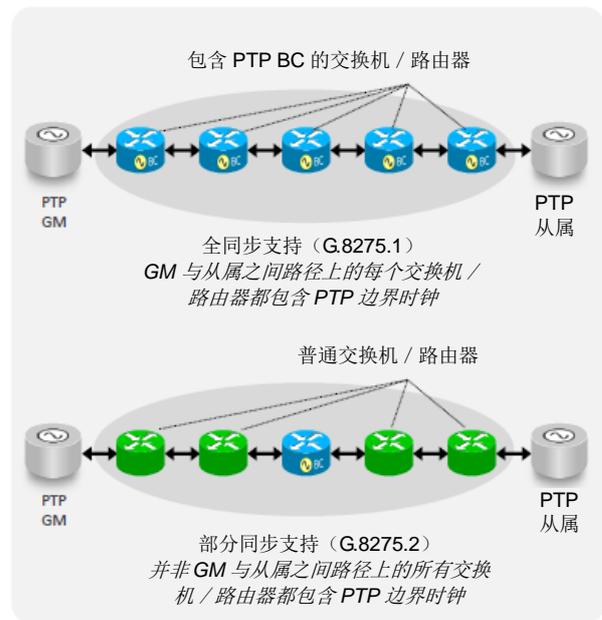
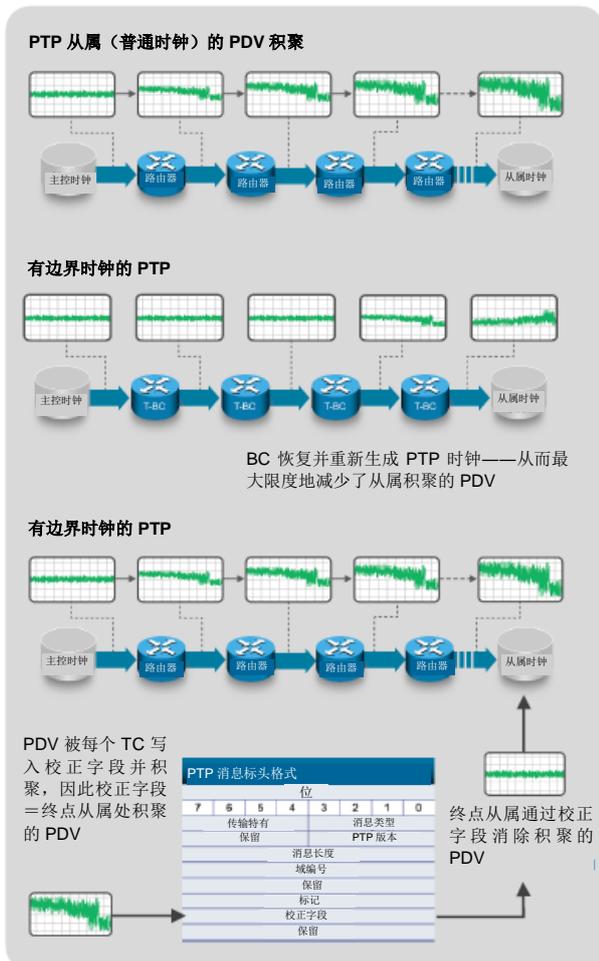


图 5：全同步支持和部分同步支持

5. 时间误差预算 (G.8271.1)

G.8271.1 定义了 PTP 部署到移动基站或需要精确时间的其他应用上的参考模型。其中描述了两个不同的部署案例，涵盖了集成式或分布式基站架构的情形。参考模型如图 6 所示：

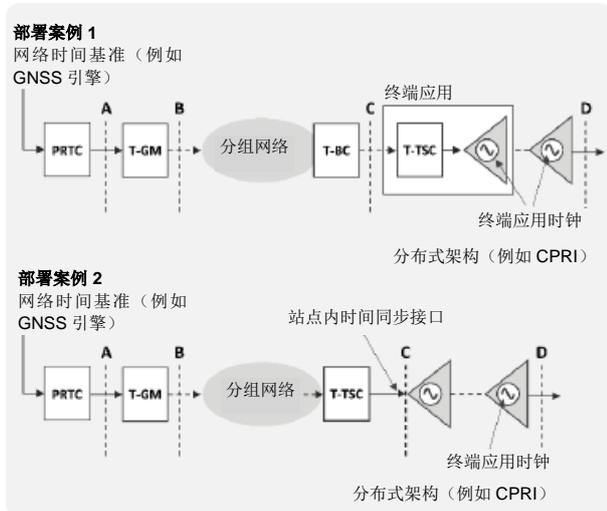


图 6: G.8271.1 网络参考模型
(G.8271.1 中的图 1)

该模型定义了 4 个不同的基准点，可以对每个基准点时间误差的限值进行界定。4 个基准点如下：

- A:** PRTC 输出处的时间精度和稳定性
- B:** PRTC T-GM (电信最高级主控时钟) 输出处的分组定时接口
- C:** 网络输出处的预算
- D:** 终端应用要求 (例如空中接口时间 / 频率规格)

对于要求精度高于 1.5 微秒的移动基站，G.8271.1 给出了网络预算示例，如图 7 所示。其中在全同步支持的基础上将预算分解成网络各部分的恒定和动态时间误差分量 (即 T-GM 与 T-TSC (电信从属时钟时钟) 之间网络中每个节点的边界时钟)。

图 7 所示的预算仅包含全同步支持的情形。部分同步支持的预算将另行编制。

- **基准点 A、B:**
PRTC 和 T-GM 输出处的最大时间误差定义为基准 (例如 UTC) ± 100 纳秒。该限值同时包含恒定和动态时间误差。基准点 B 未定义单独的限值，因为大多数实施情形下 PRTC 和 T-GM 都是集成在同一台设备中的。

- **基准点 C:**
这里的限值分为恒定和动态部分。容许每个网络节点最大产生 50 纳秒的恒定时间误差。最多容许 10 个 BC，而第 11 个节点分配给从属时钟时钟。整个网络的动态时间误差部分为 200 纳秒。对每个节点处 BC 使用的模拟表明这远未超出能力。

- **基准点 D:**
为终端应用 (即基站本身，因为 1.5 微秒要求适用于基站的无线电接口) 分配了 150 纳秒误差。为短期保持进一步分配 250 纳秒，这是在可替换的最高级主控时钟之间切换所需的。

该方法类似于搭积木，可以在任何全同步支持的网络设计方案中采用。它表示终端应用所需的性能是怎样细分并分配给各网络元件的，因此网络设计师可以根据每个 BC 的指定性能和已知的网络拓扑特性来确定支持终端应用的合适网络。

需要注意的一个要点是 cTE 的预算显著大于 dTE 的预算。在分配给网络的 1.1 微秒 (在基准点 C 测量) 中，800 纳秒分配给恒定时间误差，200 纳秒分配给动态时间误差，而剩余的 100 纳秒 (对应于 PRTC) 未被定义。这是因为在有 10 个节点的情况下，恒定时间误差快速积聚，即使分配给设备或链路的预算较小也是如此。

其次，cTE 并未被时钟沿路径过滤掉，因此它会在网络中随着节点和链路数目的增加而线性增大。dTE 并非如此，它在非相关的情形下以对数方式积聚。因此，cTE 会随着节点数目的增加极快地增大。

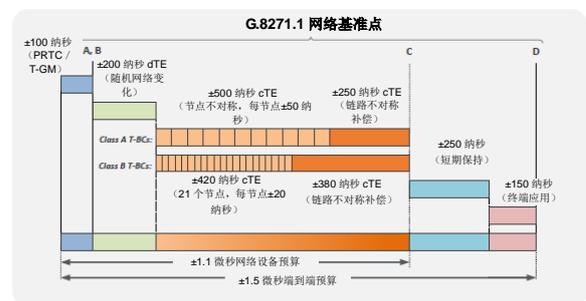


图 7: G.8271.1 时间误差预算

6. 时间误差的测量

如上文所述，时间测量总是相对于基准时钟进行的，因为基准时钟提供了测量起点。主参考时钟（PRTC）提供了精度为 $UTC \pm 100$ 纳秒的基准时间。实践中，PRTC 本身最常见的形式是 GPS 接收器，根据卫星消息调节时间。

在实验室环境中，可以采用本地稳定频率基准（例如铯或铷振荡器）驱动的时钟，因为在实验室测量可能不一定需要重新参照 UTC。

6.1 分组接口上时间误差的测量

在分组时间接口处，从属时钟的时间偏移是通过涉及的 4 个时戳（两个来自从属时钟、两个来自主控时钟）计算得出的。这些时戳中的任何误差都会在时间偏移的计算中形成误差。对分组时钟的噪声生成进行特性分析时，诀窍在于将主控时钟引起的时间误差与从属时钟引起的时间误差分开。

通过已校准的连接将主控时钟直接与试验设备相连可对主控时钟端口进行测试。如图 8 所示。

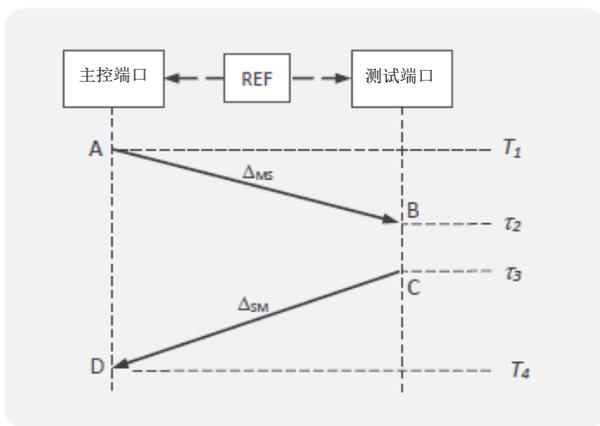


图 8: 分组主控时钟端口的测试配置
(G.8273 中的图 A.1.1)

- 时戳 T_1 表示 SYNC 消息离开主控时钟端口的时间
- 时戳 T_2 表示 SYNC 消息到达测试端口的时间
- 时戳 T_3 表示 DELAY_REQUEST 消息离开测试端口的时间
- 时戳 T_4 表示 DELAY_REQUEST 消息到达主控时钟端口的时间
- Δ_{MS} 表示从主控时钟端口到测试端口的电缆延时
- Δ_{SM} 表示从测试端口到主控时钟端口的电缆延时

SYNC 消息时戳 TE_1 中的误差用下式计算：

$$TE_1 = T_1 + \Delta_{MS} - T_2$$

DELAY_REQUEST 消息到达时间 TE_4 中的误差用下式计算： $TE_4 = T_4 + \Delta_{SM} - T_3$

如果电缆延时 Δ_{MS} 和 Δ_{SM} 相等（对称），那么在时间偏差的计算中，主控时钟端口在总体时间误差中所占的份额如下： $TE_{master} = (TE_1 + TE_4) / 2$

这称作双向时间误差。

6.2 时戳抖动

图 9 表示以太网接口中各层的相互作用。大多数设计方案中，时戳实际上附着于 MAC / PHY 接口而不是介质相关接口（MDI）。这样就能使用不同的 PHY 设备与介质（无论是铜缆还是光纤）本身连接了。

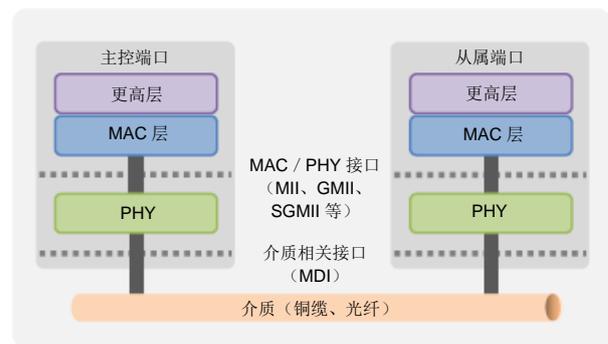


图 9: 以太网接口

对于离开端口的分组而言，时戳可能包含一定的量化运算，这是因为控制时戳计数器的时钟速度的关系。例如，如果时戳计数器以 250 兆赫的增量递增，那么分辨率为 4 纳秒，那么潜在量化误差最大为 4 纳秒。这会表现为时戳上的抖动。

其次，MAC / PHY 接口并非端口的实际输出接口。必须对时戳进行调节以考虑 PHY 分量中的延时。这会随 PHY 类型和接口速度（例如 100M、1G、10G）而变。如果 PHY 延时并非恒定的，那么这可能会在时戳本身中形成相对于分组实际离开时间的进一步抖动。

介质中的延时也可能发生变化。电缆中的温度变化可能会引起长度变化，因此延时可能会随之变化。地下或海底光纤一般不太容易受环境因素影响，主要是因为它们受阳光照射较少。

最后，在接收时，PHY 一定会接收输入比特流，恢复时钟并重构将在数字 MAC / PHY 接口上呈现的数据。由于以太网允许物理层时钟频率的最大公差为 100ppm，因此 PHY 必须通过其自身的内部时钟补偿最大 200ppm 的潜在速度差值。

为此，需要在 MAC / PHY 接口上呈现输入比特流之前对它进行缓冲。对于 1G 接口而言，IEEE 802.3 规定每个新分组必须从 16 位边界开始，因此该速度调节会给 MAC / PHY 接口上的分组到达时间造成最大 16 纳秒的抖动。对于 100M 接口而言，量化针对 8 位边界或 80 纳秒抖动进行，而对 10G 接口而言，量化针对 32 位边界或 3.2 纳秒抖动进行。

可以在很多分组上对这些抖动分量进行过滤，从而减小对总体时间误差的影响。由于抖动很可能是高频的，因此分组速率 1/10 到 1/100 的截止频率应当足以消除它了。例如，G.8275.1 中定义的全同步支持参数指定了 16 赫兹的分组速率，而每个边界时钟中的滤波器带宽为 0.1 赫兹。

6.3 恒定时间误差

比抖动更值得关注的是正向和反向延时的不对称可能形成的恒定时间误差。10G 和 100G PHY 接口需要在接收时进行适应性数字化信号处理以重构介质发出的信号。处理延时取决于线路长度和所收到信号的质量。因此，正向处理延时有可能不同于反向处理延时，尤其是在所用波长不同的情况下。这种不对称延时形成了一个必须测量和补偿的恒定时间误差。与电缆较短的实验室环境相比，这个问题在光纤较长的现场更加严重。

其次，各方向上光纤本身的长度可能是不同的。即使采用同一根光纤，发送和接收波长也是不同的，因此会在光纤中形成不同的传输延时。在实验室中，缩短光纤长度并对延时进行校准可以减小这些差异。

计算 cTE 时需要一段时间内的时间误差函数取平均。对该函数取平均以确定 cTE 的确切时间段未被定义，但在实践中 100~1000 秒范围内可以获得较好的数值。G.8260 建议根据 TDEV 函数的最小值在一段时间内取平均，这可能适合于经过后处理的测量，但无法用于实时评估。

6.4 动态时间误差

动态时间误差 (dTE) 是通过测量时间误差函数的时间间隔误差 (TIE) 确定的。它表示测量期间时间误差的变化。评估 TIE 时需要计算 MTIE 和 TDEV 指标，并将它们与预先确定的模板 (例如 G.8272 规定的 PRTC 时标) 进行比较。

6.5 最大绝对时间误差

确定最大绝对时间误差 ($\max|TE|$) 时需要测量时间误差函数相对于基准时间的最大距离。该数值可能是正的也可能是负的，因此使用了绝对值运算符。例如，PRTC 的 $\max|TE|$ 在 G.8272 中定义为 100 纳秒，即容许 PRTC 的时间在基准时间的 -100 纳秒到 +100 纳秒之间变化。

7. 总结

时间本身是一个基本物理维度，需要参照已知起点或基准点加以衡量。测量时间时，这意味着时钟需要一个基准时钟。不可能在没有基准的情况下测量时间或时间误差。

在正常日常使用中，我们的时钟和手表都是参照广播、电视或电话报道的时间来设置的。这些设备又参照公认的 UTC (协调世界时)。在现场测量中，UTC 对于测试设备和网络基础架构而言同样是一个有用的基准，因为它提供了每个地点均可获取的共同基准。现场访问 UTC 的最常见方法是使用 GPS。

在实验室中，如果知道了测量起点，那么“本地时间基准”可能往往就足够了。这时可能不需要通过 GPS 获得的 UTC 基准了，因为所有设备都能与本地基准连接。应当采用稳定频率 (例如铯或铷时钟) 以避免频率基准本身的漂移形成的测量误差。

¹ ITU-T 建议 G.810，附录一 (1996 年 8 月)

² RFC5905 第 10 节 (IETF, 2010 年 6 月发布)



Calnex 解决方案有限公司
英国西洛锡安郡 (EH49 7LR)
林利斯戈 Oracle Campus

电话: +44 (0) 1506 671 416
电子邮件: info@calnexsol.com

calnexsol.com

©Calnex 解决方案有限公司, 2016 年版权所有
本文件如有变更恕不另行通知。

CX5013 1.3 版, 2016 年 5 月