

文章编号: 2096-1618(2018)06-0645-05

# PTN 中网络负荷变化对 CES ACR 时钟恢复影响的补偿算法

孙捷, 姚尧, 曹睿

(成都信息工程大学通信工程学院, 四川 成都 610225)

**摘要:** PTN 中网络负荷的变化将导致 CES 包的时延变化, 从而使恢复的时钟产生漂移。提出了一种 CES 包的时延测量和补偿算法, 可有效降低 PTN 中网络负荷变化导致的 CES 的 ACR 恢复时钟的漂移。按 G. 8261 网络负荷模型, 用算法补偿后 ACR 的恢复时钟漂移相比于无补偿的情况可降低 75%。算法仅依赖于单向的分组到达时间, 无需双向协议, 因此易于实现。

**关键词:** 电路仿真业务; 自适应时钟恢复; 网络负荷变化; 报文时延差异; 分组传送网

**中图分类号:** TN915

**文献标志码:** A

**doi:** 10.16836/j.cnki.jcuit.2018.06.008

## 0 引言

分组传送网(packet transport network, PTN)是新一代的基于分组、面向连接的多业务统一传送技术。它将无连接、弱控制的传统分组网改造成适合于传输的面向连接的网络, 并集成了端到端的 OAM 和 QoS、50ms 网络保护倒换以及定时同步等传统传输网的特性<sup>[1]</sup>。电路仿真(circuit emulation service, CES)是 PTN 中的一项关键技术, 用于在 PTN 中传输 TDM 业务。CES 将 TDM 业务作为串行的数据码流进行切分, 并加上 MPLS 伪线和隧道标签后形成了 MPLS-TP 报文, 再封装成以太包在以太网端口上进行传输<sup>[2]</sup>。

PTN 不像 SDH 等 TDM 传输网络是同步网络, 而是当收到 CES 包重构 TDM 信号时需要从 CES 包中恢复时钟, 最常用的时钟恢复技术是自适应时钟恢复(adaptive clock recovery, ACR)<sup>[3]</sup>。ACR 根据 CES 包的到达时间从接收的 CES 包中恢复比特定信息。该技术不需要在 CES 包中显式装载定时信息, 但恢复的时钟质量受 CES 包传输抖动(即 CES 包时延及时延变化 PDV)的影响较大<sup>[4]</sup>。相比于传统的 TDM 网络, 包交换网中的传输抖动不仅更大而且是随时间不断变化的<sup>[5-6]</sup>。

PTN 中包传输的抖动会转化为恢复时钟的噪声。恢复时钟的噪声频率变化范围很大。其中高频部分是时钟抖动, 很容易被 PLL 中的窄带滤波器滤除, 而低频部分即时钟漂移。时钟漂移对恢复时钟的质量影响更大, 且非常不易被滤除。网络负荷变化是造成 CES 包传输抖动最重要的因素, 且由网络负荷变化造成的

抖动通常转化为恢复时钟的低频漂移噪声。因此, 找到一种算法去计算由实时网络负荷变化造成的包时延时间变化, 并据此对时钟恢复算法进行补偿, 对在网络负荷变化情况下提高时钟恢复的质量是非常重要的。

## 1 网络负荷变化对 CES 包时延变化影响的模型及研究

以 E1 的 CES 为例, 其 CES 包的时延通常涉及两种情况。一种情况是多路 E1 的 CES 共享一个输出以太网口。由于 CES 包的优先级是一样的, 都是最高优先级, 多路 E1 的 CES 包将共享输出以太网口的最高优先级队列。当某路 E1 产生了一个 CES 包要发送时, 若最高优先级队列中有其他 E1 的 CES 包正在发送或等待发送, 则必须等队列中所有其他的 CES 包发送完后才能发送, 此时的网络负荷体现为 E1 的 CES 路数。随着网络负荷的增加, 即 CES 路数的增加, 每个 CES 的包时延时间也会增加。而 CES 路数是网络部署时进行规划的, 会根据业务开展和迁移而发生变化但不会频繁变动。CES 路数的一次变化会使每路 E1 的 CES 包时延时间产生一个突变, 然后就稳定在变化后的值直到下次再次发生 CES 路数的变化。这个 CES 包时延的突变会使 ACR 恢复出的时钟产生一个较高的频率抖动<sup>[7]</sup>。这个抖动很容易被窄带滤波器滤除, 并不会给 ACR 的输出时钟质量造成严重影响。

另一种情况是 E1 的 CES 包和其他普通以太业务包共享一个输出以太网口。由于普通的以太包优先级比 CES 包低, 在输出以太网口只会占用低优先级队列, 不会和 CES 包抢占最高优先级队列。按照队列调度算法, 若有 CES 包要发送, 即使低优先级队列有普通以太包

在等待也会先发送 CES 包。不过如果普通以太包已经在发送了,还是要等正在发送的以太包发完后才能开始发送 CES 包。在 E1 的 CES 路数不变情况下,网络负荷体现为普通以太包的流量和包长。以太包流量越大,包长越长,网络负荷也就越大,CES 包的时延时间也会增加。而普通以太包流量取决于用户使用情况,会有一个长时间缓慢变化的情形<sup>[8]</sup>,例如一天内的普通以太业务流量呈现白天低晚上高的一个缓慢变化过程。这个流量的长时间慢速变化会使 ACR 恢复时钟产生低频漂移,是很难被滤除的。文中主要研究这种情况下的网络负荷变化对 ACR 恢复时钟漂移的影响,并给出相应的补偿算法。

PTN 中有两个重要参数指示包的传输抖动。一个是包时延时间,即每个包在传输路径上的延迟时间。由于每个包发送时网络拥塞情况不同,因此每个包的时延时间也不同。另一个是平均包时延时间,即一段时间内每个包时延时间的平均值。这个参数表示了传输路径的时延特性。

为研究网络负荷变化如何影响这两个参数,建立一个最简单的三端口包交换模型如图 1(a) 所示。NodeA 和 NodeB 都发包给 NodeC,包交换机 S1 汇聚来自 PortA 和 PortB 的包转发给 PortC。由于交换机 S1 的 portC 一次只能发一个包到 NodeC,因此为避免拥塞丢包,PortA 和 PortB 都有缓冲器 buffer 来暂存待发包<sup>[9-10]</sup>,见图 1(b) 所示。

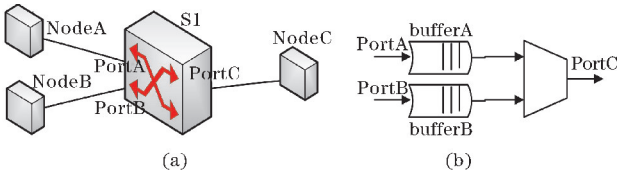


图 1 三端口包交换模型

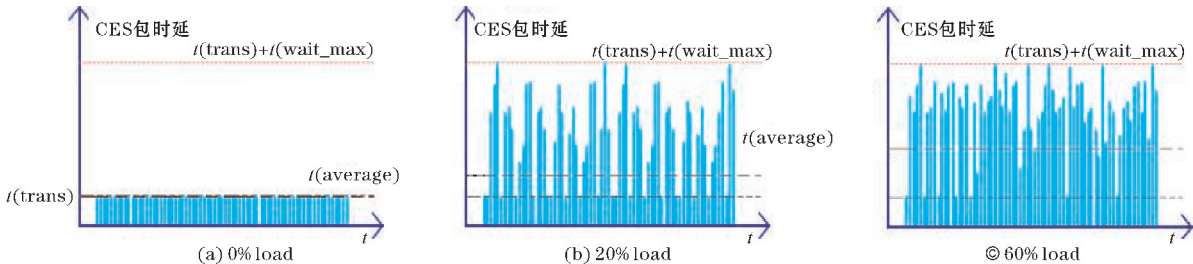


图 2 不同网络负荷下 CES 包延迟时间分布

2 包时延变化的计算及补偿算法

由以上分析可知,无论网络负荷如何变化,CES 包的最小时延时间  $t(trans)$  是不变的。核心思想是把  $t(trans)$  作为基线,若用  $t(average)$  表示平均包延时时间,则  $t(average)-t(trans)$  的差值表示由实时网络负荷

该模型中,NodeA 发送 E1 的 CES 包给 NodeC,NodeC 用 ACR 时钟恢复算法从收到的 CES 包中恢复出 E1 时钟。NodeB 发送作为干扰的普通以太包。计算 CES 包从 A 到 C 的时延时间有如下两种情形:

情形一:Node A 发的 CES 包到达 S1 PortA 时,S1 PortC 没有干扰包正在发送,这样 CES 包可以立即发送给 NodeC。包延迟时间只是传输时间加上交换机转发时间。这种情形下的 CES 包有最小延迟时间,记为  $t(trans)$ 。

情形二:Node A 发的 CES 包到达 S1 时,S1 PortC 恰好有来自 NodeB 的干扰包正在发送。CES 包必须先在 bufferA 中缓存,等待干扰包发送完后才能被发送。由于 CES 包的优先级高于干扰包,正在发送的干扰包发完后 CES 包就可以发送,即便是 bufferB 中还有其他的干扰包等待发送。假设 CES 包暂存等待时间是  $t(wait)$ ,则 CES 包延迟时间为  $t(wait)+t(trans)$ 。由于干扰包的长度以及 CES 包到达 S1 时干扰包已经发送的字节数不同, $t(wait)$  是一个变化的值。 $t(wait)$  的最大值  $t(wait\_max)$  是最长干扰包的发送时间。这里为了简化分析,认为  $t(wait)$  是从 0 至  $t(wait\_max)$  的随机值,则同步包的延迟时间是从  $t(trans)$  至  $(t(trans)+t(wait\_max))$  的随机值。

随着 NodeB 网络负荷的增加(即来自 NodeB 干扰包流量的增加),NodeA 的 CES 包到达 S1 时,有干扰包正在发送的概率也在增加,即更多的 CES 包有更长的包时延时间。CES 包的实时时延时间及平均时延时间和网络负荷的关系如图 2 所示。图 2 NodeB 发送作为干扰的普通以太包网络负荷分别为 0%、20% 和 60% 3 种情况下的 CES 包延迟时间分布。

变化而导致的包时延变化。用  $t(average)-t(trans)$  去对 ACR 时钟恢复算法做补偿即可大幅度消除由于网络负荷变化而造成的恢复时钟的漂移。要进行补偿,首先要得到  $t(average)-t(trans)$  差值。由于 ACR 技术无须在 CES 包中装载定时信息,单纯根据单向收到的 CES 包来恢复 E1 时钟。而在单向接收的情况下是难以测量每个收到的 CES 包的时延,对此提出一个创新

算法:即使用基于锁相环 PLL 的方法来获得  $t(\text{average}) - t(\text{trans})$  的差值。其算法方框图如图3所示。

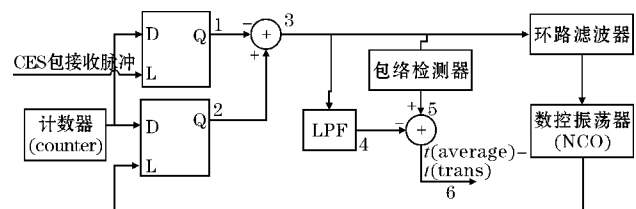


图3 基于PLL的CES包时延算法方框图

在图3中,每收到一个CES包就产生一个CES包接收脉冲,用于锁存本地计数器值以测量输入的CES包相位。CES包接收脉冲和数控振荡器NCO生成的反馈信号脉冲注入鉴相器。鉴相器输出的两个信号的相位差由环路滤波器过滤后驱动NCO去锁定输入相位<sup>[11-12]</sup>。图3中1~6点处的信号波形见图4。

随着网络负荷的增加,CES包的延时会增加,包到达的时间延后,即增加了CES输入包的相位,因而相

位误差将随网络负荷的增加而增加。图3中的 point3 = point2 - point1, 即 point3 信号表示的相位误差是一个负值且绝对值随网络负荷的增加而增加,point3 的相位误差信号就代表了实时的CES包时延时间。point3 信号经LPF低通滤波器滤除高频信号后得到的平均相位误差就代表了平均包延时时间  $t(\text{average})$ 。由于 point3 信号本身是负值,因此 point4 信号代表  $-t(\text{average})$ 。point3 信号经包络检测器检出高半波包络信号后得到 point5 信号,point5 是 point3 相位误差信号的高半波包络信号,即 point3 实时相位误差的最小值,也就是CES包时延时间的最小值  $t(\text{trans})$ 。同样地,由于 point3 信号本身是负值,因此 point5 信号代表  $-t(\text{trans})$ 。这样,point4 信号和 point5 信号经加法器后就得到 point6 = point4 - point5 =  $-t(\text{trans}) - (-t(\text{average})) = t(\text{average}) - t(\text{trans})$ 。按上面的分析,这个差值就表示由网络负荷变化而导致的包时延变化。

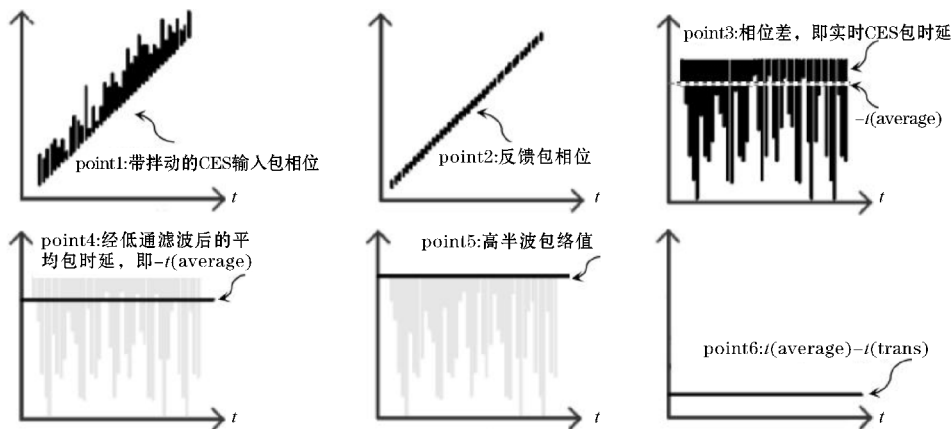


图4 CES包时延时间算法方框图中1~6点的波形

带网络负荷补偿的E1 CES ACR时钟恢复算法如图5所示。point6得到的  $t(\text{average}) - t(\text{trans})$  值直接作为补偿连接到环路滤波器的输入,数控振荡器NCO输出E1的2.048 MHz时钟。NCO输出的时钟经分频器分频后得到反馈信号脉冲,分频器的分频比为CES包字节长度 $\times 8$ ,即分频器的输出时钟频率为2.048 MHz除以(CES包字节长度 $\times 8$ )的值,表示按ACR恢复时钟得到的参考CES包到达脉冲信号。图5中时钟计数器counter的计数频率是25 MHz,即相位测量精度为40 ns。

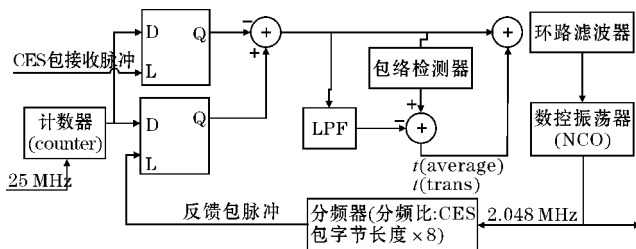


图5 带网络负荷补偿的E1 CES ACR时钟恢复算法

### 3 测试和结论

普通以太网业务包会对ACR时钟恢复造成干扰,而网络负荷变化的过程非常复杂,为了研究和测试的标准化,ITU-T G. 8261 定义了作为干扰的普通以太包的两种业务流模型<sup>[13]</sup>:

业务流模型1(TM1)中80%的负荷务必是最小尺寸信息包(64字节);15%的负荷务必是最大尺寸信息包(1518字节);5%的负荷务必是中等尺寸信息包(576字节)。

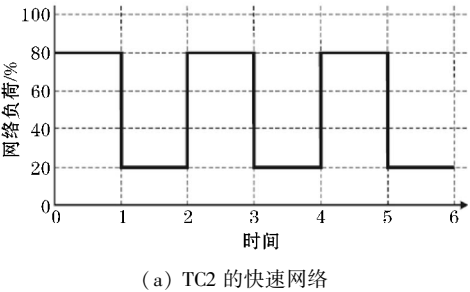
业务流模型2(TM2)中60%的负荷务必是最大尺寸信息包(1518字节);30%的负荷务必是最小尺寸信息包(64字节);10%的负荷务必是中等尺寸信息包(576字节)。

为了标准化业务负荷的变化情况,G. 8261 还定义



了几种测试用例,其中主要是测试用例2和3<sup>[14]</sup>。

测试用例2(TC2)是网络的负荷突发一个大幅变化的模型。它验证网络状态突然大变时的稳定性,负荷变化过程如图6(a)所示。开始时加80%网络扰动负荷1小时,降到20%持续1小时后,反过来又增加到80%持续1小时,再降到20%持续1小时,又增到



80%持续1小时,再降到20%持续1小时。

测试用例3(TC3)是网络的负荷在长时间内一个缓慢变化的模型。它验证网络状态很慢改变时的稳定性以及存在特别低频PDV时漂动的性能<sup>[15]</sup>。负荷变化过程如图6(b)所示,网络扰动负荷平滑地从20%到80%,再反过来变,整个周期24小时。

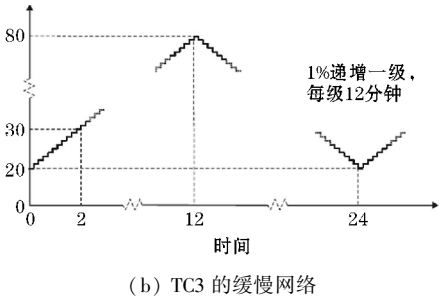


图6 网络负荷变化

研究的是网络负荷变化对ACR时钟恢复漂移的影响,因此采用测试用例3,即TC3。同时作为干扰的普通以太包越长,则对ACR时钟恢复带来的影响越

大,因此用业务流模型2(TM2)。测试拓扑也按照G.8261的规范,如图7所示。

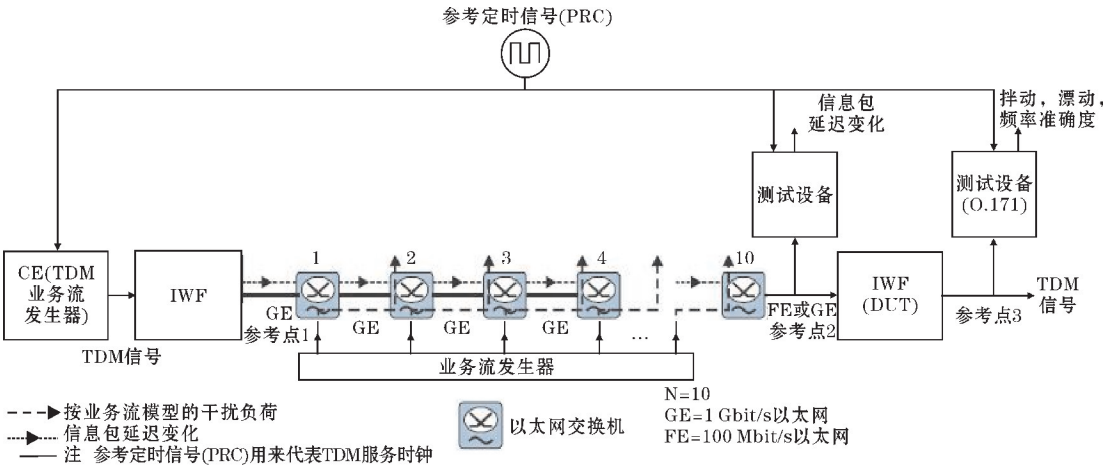


图7 测试拓扑

表1 带网络负荷补偿算法和无补偿情况下ACR恢复时钟的漂移测试结果比较

观察时间 $\tau/s$	G. 8261 MRTIE 限值/ $\mu s$	无补偿情况下 MRTIE 最大值/ $\mu s$	采用文中补偿算法情况下的 MRTIE 最大值/ $\mu s$
$0.05 < \tau \leq 0.2$	$40\tau$	2	1
$0.2 < \tau \leq 32$	8	5	2
$32 < \tau \leq 64$	$0.25\tau$	7	3
$64 < \tau \leq 1000$	16	25 (超出 G.8261 限值)	6

带网络负荷补偿算法和无补偿情况下ACR恢复时钟的漂移测试结果比较如表1所示。无补偿情况下,MRTIE(最大相对时间间隔误差)的变化范围可达25  $\mu s$ ,导致MRTIE(最大时间间隔误差)无法满足G.8261的E1业务接口抖动容限要求。然而采用文中

提出的补偿算法后,TIE的变化范围下降到6  $\mu s$ 以内,相比于无补偿的情况,TIE下降了75%,MRTIE可以完全满足G.8261要求,并且还有大量冗余。

提出的CES同步包延时测量和补偿算法可有效地降低PTN中网络负荷变化对CES恢复时钟漂移的影响。算法计算了平均包时延时间和最小包时延时间的差值,并将该差值用于PLL中ACR时钟恢复的补偿。算法是单向算法,无需双向协议,用FPGA很容易实现。算法不仅用于CES的ACR时钟恢复,还可用于IEEE 1588v2等其他PTN时钟恢复技术。

参考文献:

[1] Types and characteristics of packet transport net-

- work(PTN)equipment[S].2009.
- [2] 方子希.基于数值仿真的PTN实时性业务传输时延研究[D].北京:华北电力大学,2017.
- [3] 董浩欣.PTN时钟同步技术的探讨[J].电信网技术,2011,11:54-58.
- [4] I Hadzic,D R Morgan.Adaptive packet selection for clock recovery[C].International IEEE Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement Control and Communication,2010:42-47.
- [5] 吕小燕,张骏.自适应网络中的时钟恢复[J].中国新通信,2015,23:30.
- [6] Shuai L,Lu Y,Ji Y.A buffer level clock recovery based on least mean squares in PTN[C].IEEE International Conference on Broadband Network & Multimedia Technology,2009:71-74.
- [7] 高会生,程航.电力PTN去抖动缓存的参数优化仿真[J].光通信研究,2018(1):16-19.
- [8] 高会生,方子希.PTN时分复用业务的时延抖动分析模型[J].西安电子科技大学学报,2017,44(6):85-91/143.
- [9] 陈佳成,李哲.一种自适应时钟恢复方法[J].电子科技,2016,11:41-43+50.
- [10] 刘秋明,李雪婧.一种缓存控制的自适应时钟恢复的改进算法[J].光通信研究,2011(3):17-19.
- [11] 李志贞,张长春,高罗丝,等.一种5Gbit/s双信道并行时钟数据恢复电路[J].微电子学,2016,46(5):599-604.
- [12] 李大超.一种基于锁相环的时钟数据恢复电路的设计与实现[D].西安:西安电子科技大学,2013.
- [13] Timing and synchronization aspects in packet networks[S].2013.
- [14] 权淑静.基于 workflow 模型的业务流程测试方法研究[J].北方工业大学学报,2015(3):57-61.
- [15] 张亚鹏,赵良,刘欣,等.CES测试中时钟恢复方式验证方法研究[J].邮电设计技术,2015,9:70-73.

## A Compensation Algorithm of CES ACR Influence Caused by Network Load Change in PTN

**Abstract:** Network load change in PTN will cause CES packet delay change and bring added wander to recovered clock. This paper presents an algorithm of measuring and compensating CES packet delay, which can greatly reduce the wander of CES ACR recovered clock caused by network load change. The wander of ACR reduces 75% using the compensating algorithm comparing with uncompensated case under G.8261 network load model. The algorithm is easy to implement as only depending on one-way packet arrival time, no need any bi-direction protocol.

**Keywords:** CES, ACR, network load change, packet delay variation(PDV), PTN