

## 通过电路仿真降低无线回程成本

## 摘要

无线收发器基站(BTS)回程连接的数据速率要求在不断增长,而千兆以太网连接的成本不断下降。结果,IP/以太网回程技术成为新基站的首选。然而,对于采用了时分复用(TDM)连接(E1/T1)的大量基站,运营商不得不支付高昂的TDM线路租费,但是,可以通过使用电路仿真服务(CES),在相对低廉的以太网上传送信号来降低成本。

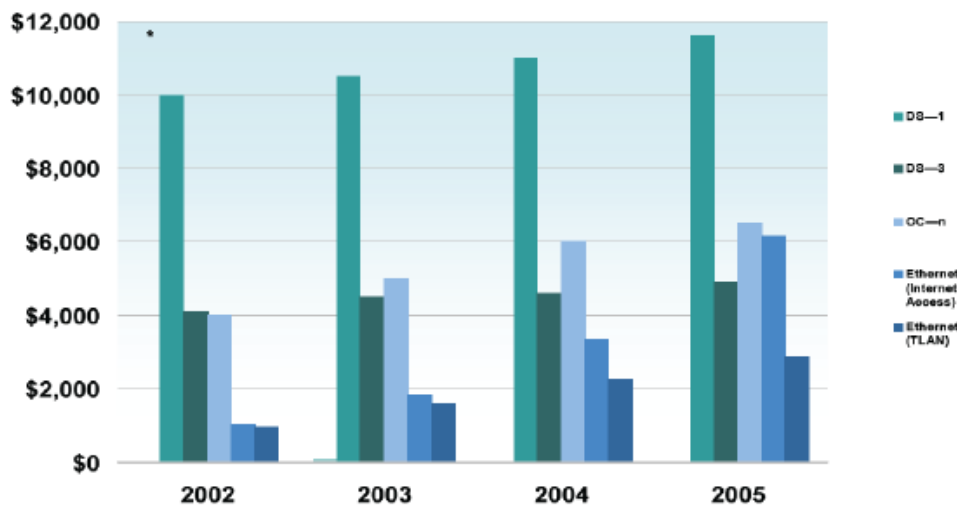
对于任何CES应用,链路远端的时钟恢复都是很大的挑战,网间功能(IWF)模块需要支持差分以及自适应时钟恢复。对于要求更高的应用,例如无线基站同步,运营商可以采用混合时序发生器(HTG)技术。本文详细讨论CES相关协议,介绍CES解决方案的时钟恢复、网络、节点和器件体系结构。文章还探讨了FPGA技术实现的优势。

## 引言

越来越多的应用要求提高带宽,同时互联网逐步普及,促使电信运营商不断提升其运营网络。目前电信运营商使用的大部分网络都是基于TDM系统。这种方式适用于传送语音业务,支持线路租借应用,而在过去几年中,数据成为主要业务需求,运营商逐步将网络过渡到基于数据包的系统。实际上,部分运营商已经在新一代解决方案中规划了全数据包或者全互联网协议(IP)网络。

要实现从TDM系统向包交换网络(PSN)的平滑过渡,运营商需要开发融合网络,在核心骨干网、城域网和接入网上使用数据包技术。考虑到减小投入和运营开支,单一网络具有切实的商业优势。但是,运营商即使规划了全IP网络,由于很难同时替换商业和政府部门使用的TDM设备,他们还是需要通过PSN传送TDM业务。而且,网络供应商来自线路租用服务的收入要远远高于数据网络服务(图1)。大量的企业涌入数据服务市场,导致竞争越来越激烈,迫使这些老企业降低费率,以保持竞争力。在欧洲和美国现有法律框架下,电信运营商即使过渡到全IP网络,他们也必须按照法律要求为第三方零售商和批发商提供TDM接入点。

图1. TDM租线和以太网服务收益对比 (来源: IDC, 2003)



对于TDM和租线服务，价格压力还不是主要问题。实际上，由于无线回程网络的增长，很多已有网络供应商的租线收入在持续增加。由于数据和租线服务收入不同，CES成为老运营商维持其收入，同时将核心网络从自有TDM线路过渡到数据包基础结构比较流行的方法。当然，只有保证最终用户的服务质量，达到他们要求的性能标准，这种方法才有效。

## 对无线网络的影响

在很多国家中，语音呼叫数量一般比较稳定，而数据业务却呈指数增长。这一发展趋势也体现在无线回程网络上。随着数据应用的增长，移动网络高速数据接入技术得到了迅速发展，以支持这些应用需求。

然而，这些需求也对无线回程网络产生了很大的压力。一个典型的射频基站(RBS)可以同时支持数百个语音呼叫。在移动交换中心(MSC)回程链路上，每个RBS保留了大约4个E1或者T1线路。而目前容量中等的移动数据连接可提供384 Kbps，新一代网络的下行链路速率范围在1.8到14.4 Mbps之间(UMTS HSDPA phase 1)。在今后的规划(HSPA发展和长期发展[LTE])中，下行链路数据速率最终会达到200 Mbps，而上行链路会达到100 Mbps。为支持接入链路速率的这种指数增长，需要采用更大的带宽来重新构建无线回程网络，例如构建以太网所采用的技术等。继续绑定E1或者T1 TDM带宽进行传送，将不足以支持数据业务增长的需求。

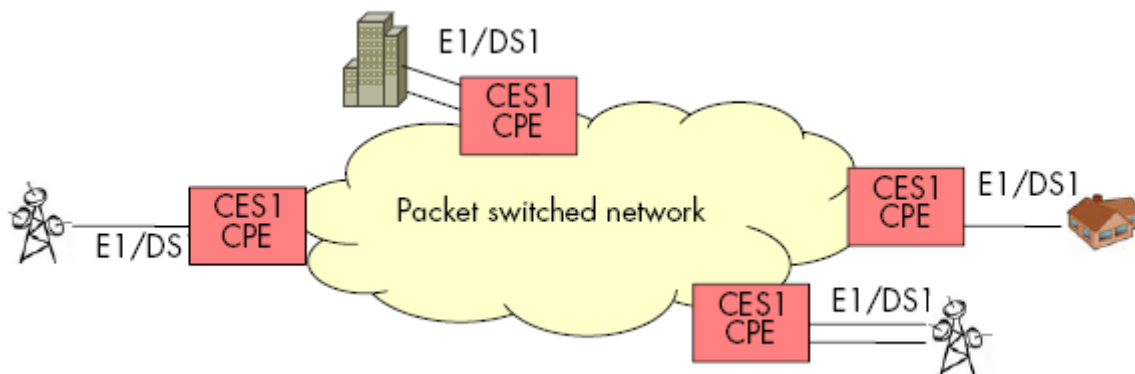
基于以太网的PSN非常适合传送数据服务，而语音呼叫是基于TDM的，需要在PSN上进行特殊处理。而且，无线基站需要高质量时钟参考才能保证射频信号不会影响邻近基站，当移动用户从一个基站移动到下一个基站时，实现无缝语音呼叫传递。大部分基站目前使用TDM网络接口来传送语音和数据业务，从中心站点同步源向所有基站分配网络同步信号。目前的以太网不支持同步信号分配。

## CES和传送协议

CES IWF支持从TDM业务向数据包业务的平滑过渡，反之亦然。不使用带宽固定的复用TDM电路，而是将TDM业务打包，在单一网络上将其与其他TDM或者IP业务进行汇总。传统的TDM网络隐含着双重目的：传送数据，维持全网信号同步。而今天的PSN并不支持网络同步。为弥补这一点，网络运营商开发了同步覆盖网络，或者使用昂贵的、基于GPS的参考时钟。

对于任何CES应用，链路远端的时钟恢复是很大的挑战，IWF模块支持差分以及自适应时钟恢复，但是对于要求更高的应用，例如无线基站同步，设计工程师可以采用HTG技术。CES IWF支持几种独立的包承载E1/DS1 TDM数据引擎。每个输入端口的TDM数据经过处理后，作为数据包流进行转发。在远端，数据包重新装配成TDM数据流。每个TDM端口都可以在入口处独立定时，重新装配功能支持独立时钟恢复，对出口的TDM数据重新定时。图2所示为通过PSN对TDM数据进行包封的一种方法，其具体实现采用了流行的标准化SAToP和CESoPSN (这两种标准均符合城域以太网论坛(MEF-8)的建议)。

图2. CES支持通过PSN传送TDM信号



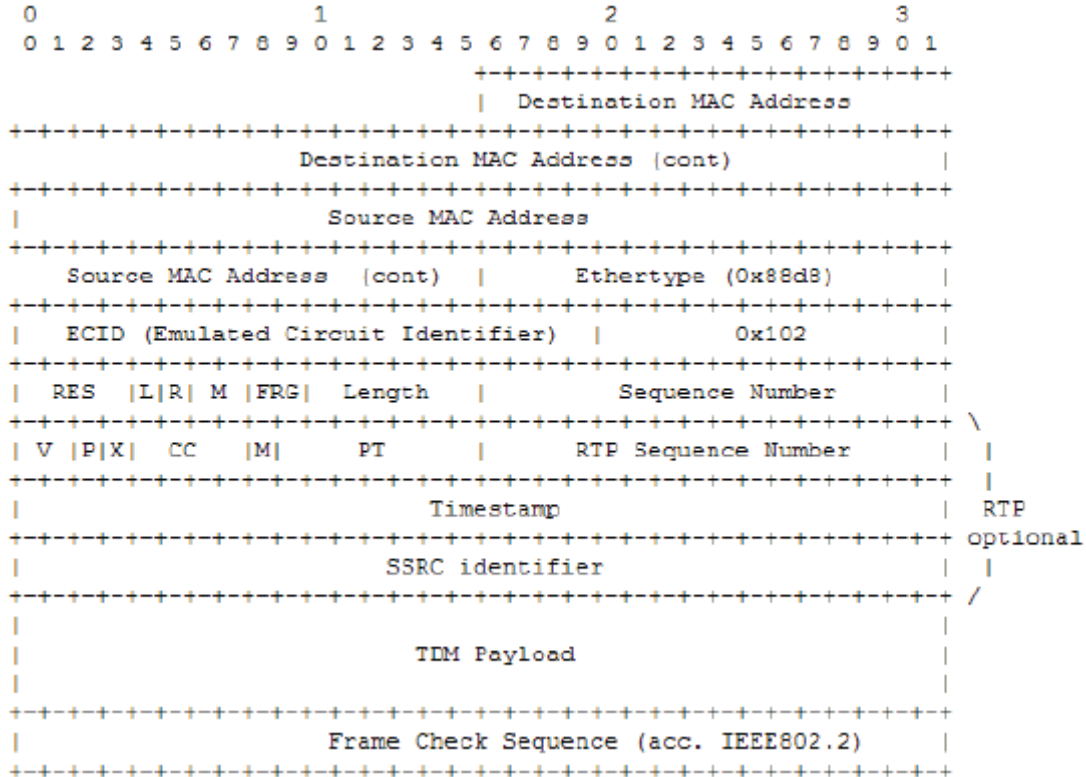
## SAToP

SAToP包封方法(由IETF RFC4553定义)适合传送完整的TDM流，不需要考虑成帧或者64 kbps和DS0时隙间

题。例如，E1 TDM数据流。IWF对到达数据流以256字节进行打包，插入SATO P包头，通过网络发送包封后的数据包。这种包封方法提供了简单的仿真服务，SATO P链路只需要提供几个普通连接就可以完成安装和服务，是不复杂的链接方式(例如，目的地系统和电路标识符指示TDM通道)。

数据包构成如图3所示。以太网MAC包头的专用域指示数据包中有TDM负载。CES包头含有仿真电路标识符域，标识出专用TDM通道。随后的域是控制字，含有状态位和用于探测接收机数据包丢失或者乱序的序号。状态位指示远端的本地报警状态；接收机使用该信息进行报警，或者在输出TDM流中插入报警指示信号(AIS)。一个可选的实时协议(RTP)包头被用于在数据包中插入时间戳，保证TDM数据的传送速率和另一端接收速率相同。只有接收和发送IWF使用相同的时钟来处理这些时间戳时，这才能正常工作。

图3. CES数据包格式



链路IWF解包封侧的一个关键特性是抖动缓冲，它处理PSN中的延迟变化。PSN上的每个数据包交换机都有内部缓冲、排队和调度功能，引入了一定的延迟。当CES数据包穿过PSN时，延迟不断累积，使得每个数据包的延迟都不同。这种现象量化表示为PSN的数据包延迟差(PDV)或者数据包抖动。解包封侧必须有足够大的抖动缓冲，以支持一定量的PDV。

典型的IWF在实现时每个通道都有大约10到50 ms的抖动缓冲。当数据通过CES链路开始传送时，接收机在启动TDM电路缓冲之前等待一定的时间。缓冲接近半满时比较适合开始进行处理。如果没有这一延迟，PDV的变化很快会导致缓冲欠载。最理想的情况是，抖动缓冲足够大，能够处理在PSN上看到的全部PDV。反过来，端到端TDM电路还存在延迟上限问题。为支持各种类型的网络工作，找到PDV和延迟之间的最佳平衡，抖动缓冲的大小应该是一个可配置的参数。

除了抖动缓冲大小，TDM数据包长度也会影响延迟。SATO P包封方法使用户能够确定有多少TDM比特累积在一个数据包中。对于E1 TDM链路，默认是每个数据包256字节，或者1 ms的TDM数据。其具体实现应支持125 μs步长的数据包配置。为减小延迟，选择125 μs配置。而需要注意的是，每个数据包的开销是固定的。对于延迟较低的包封，包开销成为主要因素，会导致TDM到数据包层的数据速率翻倍。SATO P包封提供了更简捷的仿真服务，由于只需要提供几个普通连接，因此，SATO P链路的安装和服务比较简单(例如，

目的地系统和电路标识符指示TDM通道)。

## CESoPSN

另一种封装方法是CESoPSN (由IETF RFC5086定义), 其带宽效率要比SATO P高。它支持用户选择采用哪一时隙(64-kbps通道或者DS0通道)通过PSN进行传送。在带宽受限的接入网中, 这种高效的方法提高了经济效益。在IWF识别这些DS0时, 需要采用TDM成帧功能来找到帧对齐信号以及每个时隙。打包后的数据与TDM帧结构对齐, 一个或多个完整的TDM帧封装在一个数据包中发送到网络上。远端IWF需要帧发生器来重建完整的E1或者T1本地帧结构, 填充到从数据包流接收的DS0中。这种CESoPSN的IWF实现方式支持软件可配置时隙表, 该表确定了每个DS0是否通过PSN进行传送。CESoPSN标准描述了各种选项, 可以进一步优化带宽, 以及怎样处理信号。

## 时钟恢复和网络同步

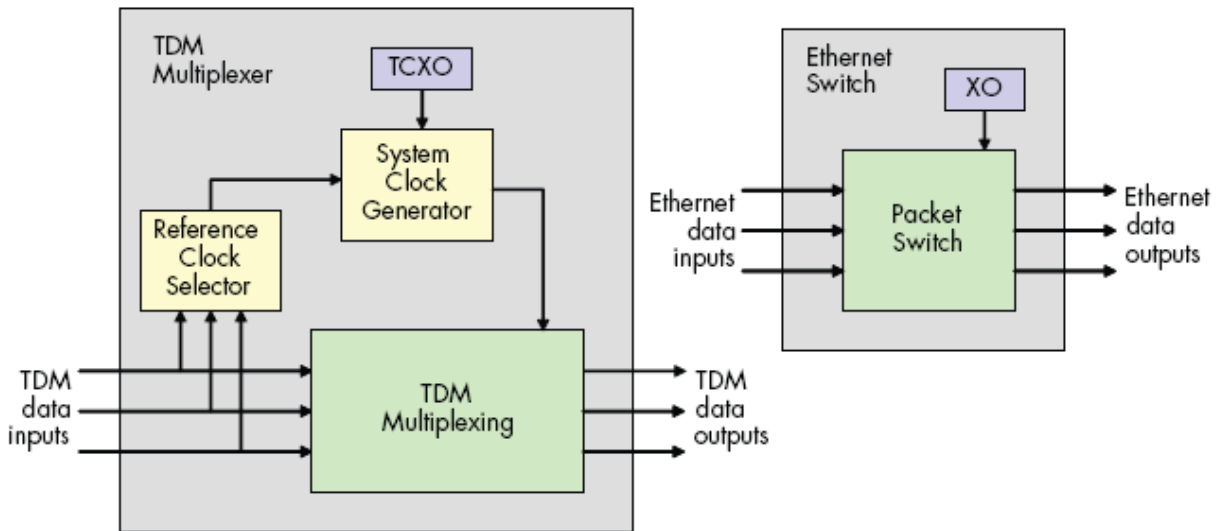
时钟恢复功能保证了解包封侧TDM发射机时钟速率能够与包封侧TDM接收机的时钟速率相匹配。如果没有精确的时钟恢复, 会导致抖动和游走过大, 出现TDM误码。显然, 误码是不能接受的, 而游走也必须加以严格控制。ITU-T建议G.823和G.824定义了TDM接口的最大游走。例如, E1接口输出游走必须保持在18  $\mu$ s以下。而且, 新标准(ITU-T G.8261)专门定义了通过PSN承载CES实现TDM接口的性能。根据这一标准, 游走在某些环境中必须保持在4.3  $\mu$ s以下。当TDM电路用作无线基站的参考时钟输入时, 要求会更加严格。

任何CES传送系统的一个关键特性是远端的时钟恢复。在大部分使用TDM电路的应用中, 例如E1、T1或者SONET/SDH, 链路用于传送信息位, 通过网络分配时钟信息。虽然基本CES保证了TDM信息位的可靠传送, 但是不保证仿真电路能够用于分配时钟。在检查CES的时钟恢复功能之前, 必须要考虑正常的TDM电路和网络时钟分配。

TDM或者SONET/SDH系统一般有一个中心时钟发生器(由ITU-T G.813定义), 称为SDH设备时钟(SEC), 所有输出接口都以它为参考时钟(图4, 左侧)。采用一组同步锁相环(PLL)和滤波器来产生内部需要的各种时钟频率, 以降低网络累积的抖动和游走。SEC可以工作在自由运行模式下, 但是一般锁定在一个输入接口上。通过协议, 系统软件确定哪些接口可以用作参考时钟输入。当链路失效导致参考时钟切换时, 通常以这种方式来分配冗余输入。通过这些基本设置, 建立完整的时钟分配网络, 一个节点链接至主参考时钟(PRC), 所有其他节点形成树形网络, 以分配同步信号。每个最终系统都有一个跟踪到同一PRC的时钟。

通过仔细设计基于E1/T1或者SONET/SDH的时钟分配网络, 使网络边沿参考时钟质量足够高, 可以用作其他外部网络的参考时钟。例如, 一个典型的无线基站(RBS或者BTS)也可以使用E1/T1网络接口作为时钟参考。这一时钟还可以继续用作射频或者空中接口的参考时钟。当所有邻近射频基站从同一同步网络获得它们的时钟参考时, 能够降低射频网络的干扰和误码。

图4. TDM复用器和以太网交换机典型的系统时钟体系结构



另一方面，数据网络与TDM网络不同，并不是在节点之间分配网络同步信号。互联网协议/多协议标签交换(IP/MPLS)路由器或者以太网交换机的典型结构是每个接口卡都有一个本地时钟振荡器，用作本地板上发送线路接口的时钟参考(图4，右侧)。这一本地时钟振荡器工作在自由运行模式下。对于以太网接口，唯一的要求是时钟在标准值范围 $\pm 100\text{ppm}$ 以内。通过增加或者减小数据包间的空闲时间或者间隙(IPG)来解决由数据链路发送侧和接收侧时钟差造成的缓冲过载或者欠载问题。这种机制非常适合防止数据缓冲过载，但是不能在PSN节点之间分配同步信号。每个链路都有自由运行的时钟，这些时钟不与其他链路链接，禁止建立时钟分配网络。

总之，在PSN上实现CES时，需要考虑两个因素。首先，PSN并不为传送TDM流提供可靠的时钟参考。PSN的PDV使得正确重建接收端时钟速率非常困难。其次，没有同步网络，通过CES承载的TDM电路不能用作同步分配网络中下游节点的参考。需要通过特殊手段来驱动CES提供的无线基站时钟。

### 仿真电路的时钟恢复选择

CES时钟恢复有两种基本网络结构方式：自适应和差分模式。在两种方式中，接收机需要一个锁频环(FLL)、PLL或者两种方式的结合来精确地控制输出TDM流的频率和相位。

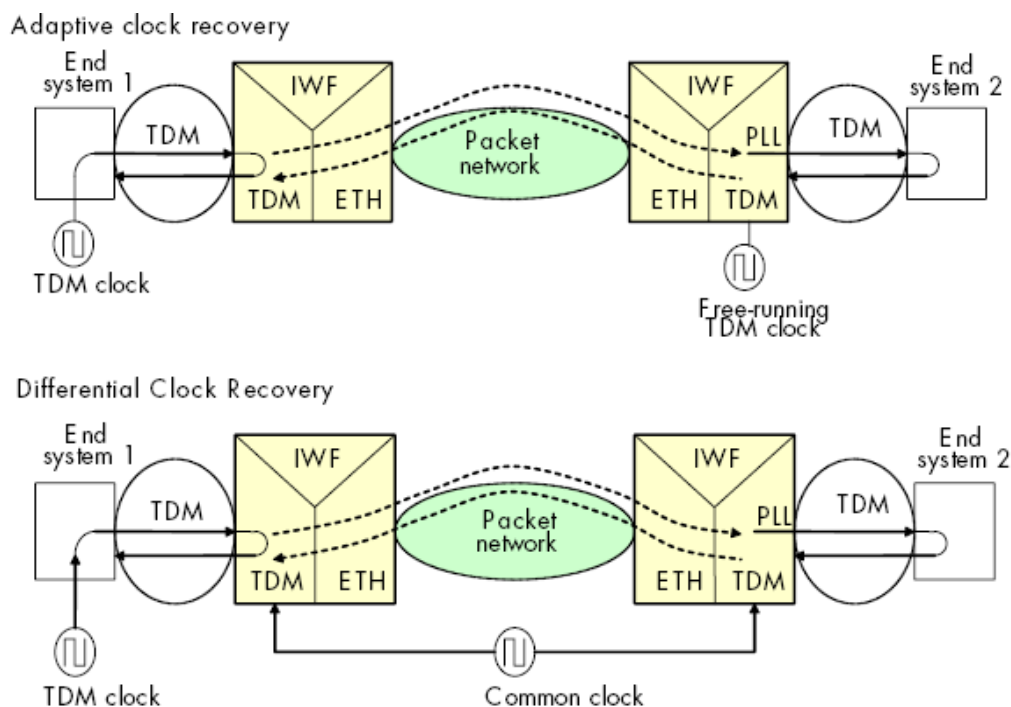
#### 自适应时钟恢复

对于自适应时钟恢复的情况，如图5所示，控制环只使用抖动缓冲填充级作为输入变量。当平均缓冲使用率增大时，必须提高TDM时钟速率才能防止溢出。类似的，当缓冲耗尽过多时，降低TDM时钟速率。这一控制环必须能够处理数据通过PSN时造成的各种损伤。最难处理的是PDV和数据包丢失。ITU-T建议G.8261全面描述了这类网络损伤，以及必须采取的测试方法。

由于PSN并不为TDM网络提供时钟分配网络，因此，必须有精确而且稳定的本地时钟。对于E1/T1传送网，要求从标准时钟获得的时钟精度要优于 $\pm 50$

ppm。影响时钟稳定性的主要因素是温度变化，它决定了时钟频率随时间变化的偏差。温控晶振(TCXO)或者恒温振荡器(OCXO)能够减小温度的影响。时钟长期稳定性是自适应时钟恢复的关键因素。当数据包由PSN承载时，延迟会随时间变化而变化。这种PSN的24小时模式随人类每天的活动而变化：工作期间和傍晚时高，这是由繁忙的网络链接造成的，而晚上和夜间逐渐降低。在IWF中必须处理这种变化，要求采用频率稳定的时钟。如果不能维持时钟的稳定，会导致游走性能达不到ITU-T G.8261的要求。

图5. 自适应和差分时钟恢复



### 差分时钟恢复

另一恢复时钟的方法是差分时钟，在该方法中，封装和解封装IWF都可以使用公共参考时钟。封装侧把时间戳插入每个发送包中，解封装侧提取出时间戳，把它用作FLL或者PLL的主输入参数，控制输出TDM流的频率和相位。差分方法不直接依靠每个数据包的到达时间，能够比较容易地处理PSN的网络损伤。它使用时间戳来控制发送比特率。

有几种网络结构可供网络级同步选择使用，有些已经应用在供应商网络中。一种流行的方案是在CES链路的核侧使用PRC，在CES链路的接入侧使用GPS接收机。虽然GPS接收机能够为CES IWF提供高质量的参考时钟，但是很多设备站点存在着GPS卫星信号接收问题。还有高质量时钟振荡器备件带来的成本问题等。而且，电信网络供应商无法控制该技术的可靠性，例如，如果GPS卫星网络被关掉，或者临时拥塞，都会影响网络性能，甚至导致网络瘫痪。

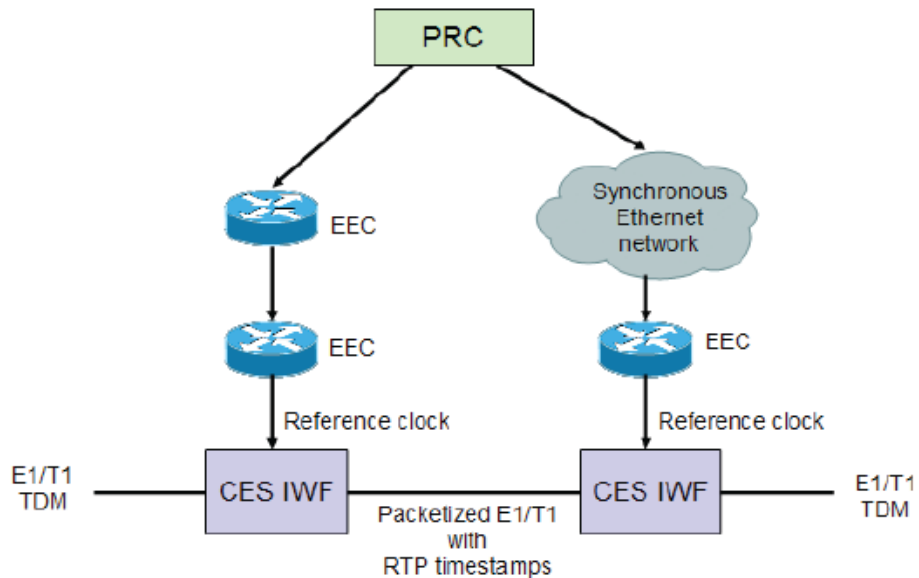
### 新的网络同步体系结构

业界为PSN建议了两种新的网络同步体系结构，目前正在标准化过程中。第一种是同步以太网，由ITU-T G.262定义，另一种通常被称为分组时钟，它基于IETF NTP或者IEEE1588标准。

#### 同步以太网

同步以太网预计在2008年下半年实施，它是以太网链路的物理层，为网络中的节点分配时钟(参见图6)。与SONET/SDH非常相似，每个节点都有本地时钟，或者以太网设备时钟(EEC，由ITU-T G.8262定义)，这些时钟来自一个输入接口的到达时钟或者本地自由运行的振荡器，用于确定每个接口的发送时钟速率。同步以太网方法要求仔细构建树形网络，该网络的所有节点为每个CES IWF分配来自PRC的公共时钟参考，使用基于RTP的恢复差分时钟来为输出TDM流产生时钟。

图6. 基于同步以太网带有RTP和差分时钟的CES

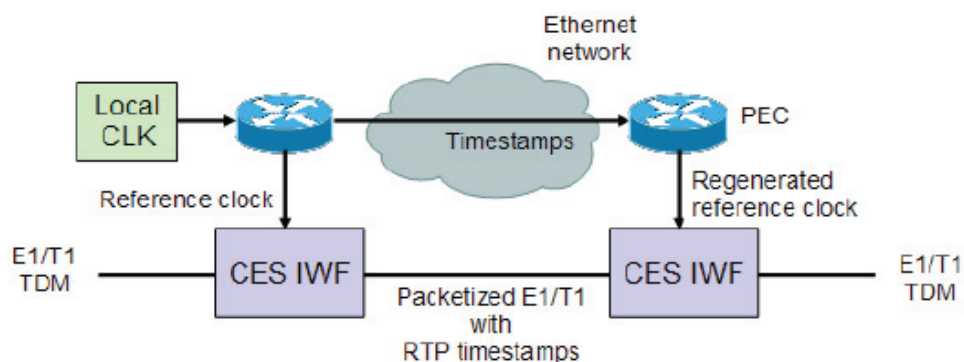


基于和SONET/SDH相同的体系结构，同步以太网的性能有可能达到目前SONET/SDH网络的水平。然而，同步以太网要得到广泛应用，网络的中间交换节点需要提供硬件和软件支持，否则这一方法只能用于端到端网络同步。目前生产的以太网交换机或者路由器都会切断网络同步，因为每个输出端口都同步于自由运行的振荡器(参见图4下面)。正是因为如此，同步以太网目前只是用在新网络中，例如小网络域，长期供应商可以通过设备更新来覆盖这个网络。

### 分组时钟

考虑到同步以太网的实施局限性，业界的注意力转向分组时钟，这一替代方案对中间网络的依赖不大。分组时钟提供了短期解决方案。它没有使用物理层时钟，而是依靠分布在网络节点中的时间戳消息。网络中的专用时间服务器向客户系统定时发送时间戳。客户端使用时间戳来衡量客户应用，以便同步其本地时钟频率和相位。此外，还提出了数据包设备时钟的概念(PEC，由ITU-T G.8263定义)，使用基于数据包的时间戳来为本地系统时钟参考信号，如图7所示。在一个CES IWF上采用高质量参考时钟来作为参考，以及由PEC处理的时间戳消息为第二个CES IWF重新产生参考时钟。正在开发专用HTG为CES IWF为同步以太网和分组时钟协议提供支持。

图7. 基于分组时钟带有RTP和差分时钟的CES



但是，需要改进现有的分组时钟协议，以建立电信运营商机网络同步结构。建议的改进方案有支持无线网络基站同步的时钟性能参数，节点或者部分网络瘫痪时支持同步客户端实现多个冗余同步服务器之间进行受控和无缝交换的冗余机制等。

### 灵活的FPGA很好的解决了CES设计挑战

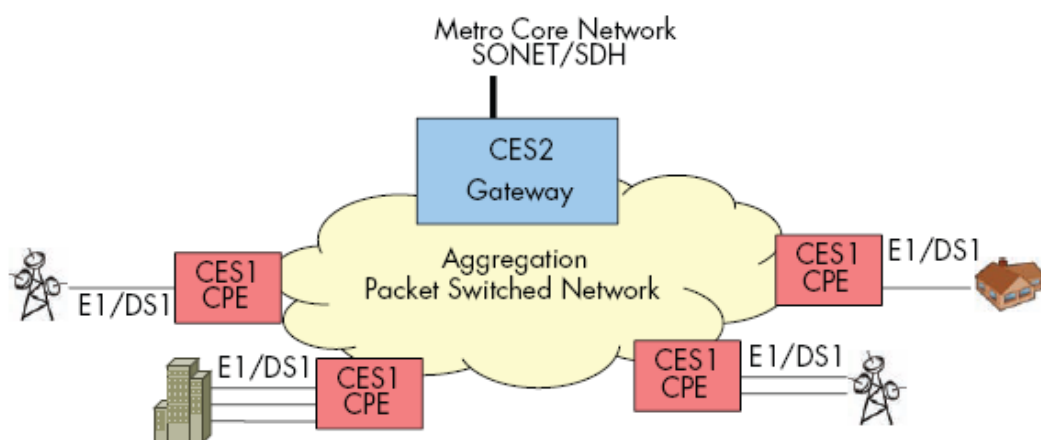
通过FPGA生产商之间的协作，例如，Altera和知识产权(IP)供应商，现在可以提供全包IP内核，它能够在基

于FPGA的平台上实现CES系统的所有关键功能。采用这种设计，系统开发人员可以轻松地定制所需要的TDM接口类型和数量，加入定制逻辑或者协议来突出产品功能，或者适应CES包头域。随着CES网络体系结构的不断发展，具有可编程能力的FPGA会有很大的应用机遇。

SAToP和CESoPSN封装模式采用IP内核实现，使用标准信号接口将内核集成到产品系统中。在这两种解决方案中，CES1面向成本敏感的紧凑终端系统，例如用户端设备(CPE)或者无线网络终端，其低成本FPGA可以支持32个TDM通道。另一方案CES2非常适合通道数量较多的网关或者汇集节点。网关IP支持数百个E1/T1 TDM通道的CES，支持经过通道处理的OC-12或者STM-4。这一IP还可以用作路由器或者交换机高密度E1/DS1电路仿真卡的内核。

CES1和CES2基于相同的内核体系结构和实施方法，因此，用户可以根据应用需求而选择最合适自己的方案。在图8所示的组合网络设计中，在边沿节点使用CES1，在汇集点使用CES2。专门增强了仿真电路端到端IP，以确保良好的互通。此外，采用可选片内高密度E1/T1成帧器来扩展CES IWF内核，提供TDM监视和成帧功能，还可以支持E1/T1信号的SONET/SDH映射器/去映射器。

图8. 网络设计中结合使用了CES1接入和CES2网关内核



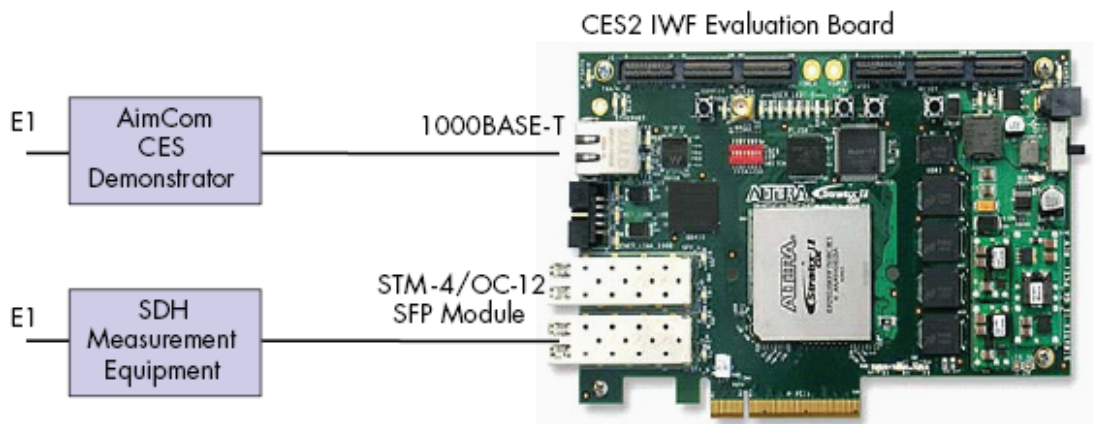
CES的IP内核提供了全包解决方案，结合使用硬件状态机和滤波技术，解决了软件和CPU性能瓶颈。例如，CES内核连续工作时不需要外部CPU。只需要提供配置，周期性的读取报警状态或者性能计数器。由IP内核在内部处理FLL/PLL所有的协议和控制环，完成时钟恢复。

## 总结

构建CES IP内核以满足运营级网络的严格要求，用户可以放心的是，对这些内核进行了全面彻底的测试，以确保符合CES、TDM接口和PSN以及网络同步的所有应用标准。还对CES或者同步与其他现有产品和器件的协议通用性进行了评估测试。对IP内核在真实网络环境下进行全面测试，以降低在系统或者网络中引入新技术而带来的工程风险。这样，系统设计人员可以把精力集中在集成系统组件上，而不必担心仿真电路的网络性能。

对于使用这些IP内核感兴趣的客户，可以向他们提供各种网络测试环境的性能评估报告和测试结果。系统设计人员或者网络运营商可以利用每个IP内核的参考配置来评估IP，使其能够用在他们独特的CES配置中，如图9所示。

图9. CES2参考设计配置



### 详细信息

- AimValley BV:
- 伪线和电路仿真服务:
- 伪线和电路仿真技术简介:
- SAToP (IETF RFC4553):
- CESoPSN (IETF RFC5086):
- 城域以太网论坛(MEF-8):
- ITU-T建议G.813:
- ITU-T建议G.823:
- ITU-T建议G.824:
- ITU-T建议G.8261:
- 同步以太网:
- 分组时钟:

### 致谢

- Jan Venema, 首席技术官, AimValley BV。
- Sri Purisai, 战略市场经理, 通信业务部, Altera公司。