

# 以太网电路仿真业务中基于本地时戳的自适应时钟方法<sup>\*</sup>)

戴锦友<sup>1,2</sup> 余少华<sup>2</sup>

(华中科技大学计算机学院 武汉 430074)<sup>1</sup> (武汉邮电科学研究院 武汉 430074)<sup>2</sup>

**摘要** 对以太网电路仿真业务中使用的时钟同步方法进行了详细分析。针对普通自适应时钟方法的不足,提出了一种新的自适应时钟方法——基于卡尔曼滤波的本地时戳方法。该方法可归于基于时戳的自适应时钟方法,但不需要在网络上传送时戳信息。该方法的原理是利用本地业务时钟和计数器得到表示远端和近端业务时钟的时戳信息(本地时戳)。通过统计运算将时戳信息转换成满足卡尔曼过程和测量方程的随机序列,并利用卡尔曼滤波算法从该随机序列中过滤噪声,得到真实时戳。利用得到的时戳信息调节压控振荡器,从而使本地业务时钟跟踪远端业务时钟。设计了仿真设备实现本方法以及普通自适应时钟方法,并搭建测试拓扑进行评估和验证。测试结果表明,本方法综合性能更好。

**关键词** 以太网,电路仿真,时钟恢复,自适应,卡尔曼滤波

## Local Timestamp-based Adaptive Clock Method for TDM over Ethernet

DAI Jin-You<sup>1,2</sup> YU Shao-Hua<sup>2</sup>

(School of Computer, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)<sup>1</sup>

(Wuhan Research Institute of Post and Telecommunication, Wuhan 430074)<sup>2</sup>

**Abstract** Clock methods for circuit emulation service over Ethernet are introduced and analyzed. A novel adaptive clock recover method——Kalman-filter Based Local Time Stamp(KBLTS) method is presented. The method can be thought as a timestamp based adaptive method, but no timestamp needs to be transported over the Ethernet network. With the local service clock, the timestamp information(local timestamp) related to the service clock of the remote end and the near end can be attained by a local counter. By statistics computing, the timestamp information can be transformed into a random data sequence that is appropriate for the Kalman equations. By using Kalman filter algorithm, the noise brought about by Ethernet network can be filtered and the true timestamp can be extracted. With the timestamp, local service clock can be adjusted the same as the far end by a voltage-controlled oscillator. A kind of simulation device is designed and a test platform is set up to test and verify the method.

**Keywords** Ethernet, Circuit emulation, Clock recover, Adaptive, Kalman filter

## 1 引言

业内一致认为下一代网络是基于高速分组技术的网络,而且具备同时承载语音、视频和数据等多业务的能力。规模最大的分组网 Internet 将是下一代网络的主体,IP 和以太网等主流分组技术是实现计算机互联网、传统电话网和有线电视网三网融合的关键技术。

就以网技术而言,目前这种技术已在接入层面占有 90% 以上的应用份额,而且以太网技术在局域网中表现出的种种优势,正在逐渐使其成为城域网甚至广域网中的承载网络。同时,应用最广泛的网络协议 IP 也多在以太网上承载。电信级以太网的产生更是推动以太网向更深、更广的方面发展。以太网技术将是下一代分组网的主流技术之一。

另一方面,从现有网络发展到下一代网络,是一个演进的过程,而不是一场对现有网络和技术完全否定的革命。基于 TDM (Time Division Multiplexing) 的 SDH (Synchronous Digital Hierarchy) 等技术 在现有网络上已经有大量应用。

这样,在向下一代网络演进过程中,以 SDH 等为代表的 TDM 网络与以 IP 和以太网等为代表的分组网络将长期共存。SDH 和 Ethernet 也必将相互融合。目前在 SDH 上传送 Ethernet 已有大量应用,但是当分组网处于主导地位时,以诸如以太网的分组网传送 SDH 等 TDM 业务也是必要的。如何实现以太网和现有 TDM 网络的无缝连接,是网络研究领域重要的课题。

关于分组网传送 TDM 的技术已有相关标准<sup>[1,5]</sup>做了详细说明和规定,同步是其中的重要部分。基于统计的异步的以太网传送同步的 TDM 业务,必然存在同步 TDM 码流和异步以太网数据包之间的双向转换,TDM 两端时钟的同步是首先要解决的重要问题。从相关标准<sup>[6~8]</sup>可知,TDM 对同步有着极高的要求。

两端时钟同步主要有网络时钟法、差分方法和自适应时钟恢复方法等三类方法<sup>[5,6]</sup>。前两类方法都要求在 TDM 两端提供同一的外部参考时钟,这是当前普遍应用的以太网难以满足的要求。而自适应时钟恢复方法则依据以太网数据包

<sup>\*</sup>) 国家高技术研究发展计划“八六三”项目(2003AA 121110、2005AA 121410) 资助; 电子基金项目(“城域网多业务环 MSR 技术和面向比特的 EOS 方法”) 资助。戴锦友 高级工程师, 博士研究生, 主要研究方向为电信级以太网和 IP 互联网络; 余少华 博士, 教授级高工, 博士生导师, 主要研究方向为 IP 互联网络。

在网络上的传送情况恢复业务时钟,所以较适合于现有以太网。

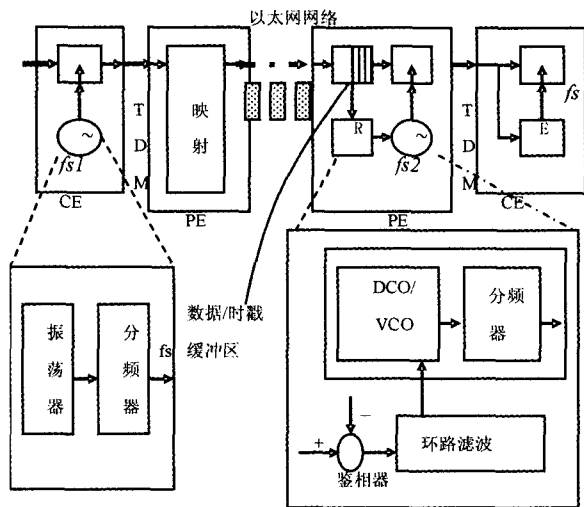


图1 自适应方法示意图

自适应时钟恢复方法如图1所示,基本类似于PLL(Phase-Lock Loop)的功能结构。根据数据包从远端传送到近端的到达情况来得到差错信号,用差错信号控制VCO(Voltage-Controlled Oscillator)或DCO(Digital-Controlled Oscillator)来消除两端PE(Provide Edge)或CE(Customer Edge)<sup>[3~5]</sup>的业务时钟频率差异。按照使用的信息可以分为基于接收缓冲区填充级(以下简称缓冲区方法)和基于时戳(以下简称时戳方法)两类方法。图1中,如果输入鉴相逻辑的是两端的时戳差异,则是时戳方法;如果输入鉴相逻辑的是缓冲区状态数据,则是缓冲区方法。图中带有字母“R”的方块表示时钟恢复模块,其功能是使 $f_{s2}$ 最终和 $f_{s1}$ 频率相同。

缓冲区方法是根据接收缓冲区(去抖缓冲区)的使用情况来得到两端业务时钟的差异,同时利用这个差异调节本地业务时钟,使得两端业务时钟趋向一致<sup>[9~11]</sup>。其特点是稳定、实现相对简单,但锁定(两端时钟频率基本相等)时间较长。

时戳方法则为:在发送携带TDM信息的以太网数据包时,获取该数据包的发送时戳,并将该时戳信息封装到数据包。在接收数据包时生成接收时戳,并利用接收时戳和发送时戳的差异调节本地业务时钟,使得两端业务时钟趋于一致<sup>[12]</sup>。其特点是锁定较快,要求两端都能生成时戳,而传递时戳需要占用一定的网络带宽,并且受网络的时延抖动影响较大。

本文提出一种新颖的基于时戳的自适应时钟恢复方法——基于卡尔曼滤波的本地时戳方法(Kalman-filter Based Local TimeStamp, KBLTS)。相对于普通时戳方法, KBLTS不需要在数据包中显式传递时戳信息,并且更稳定。相对于普通缓冲区方法来说, KBLTS的锁定时间更短。而且, KBLTS的滤波方法可用硬件或软件实现,相对于大多数时钟方法由硬件实现, KBLTS方法更灵活。

## 2 KBLTS方法概述

KBLTS方法的功能结构如图2所示。

在接收PE(为表述方便,本文将实施自适应恢复时钟的PE称作接收PE,与之相通信的PE称作发送PE,实际上所

有PE既可以是发送PE,也可以是接收PE),接收缓冲区用于缓存从以太网侧到达的数据包中携带的TDM信息,以吸收网络引起的时延抖动。以太网侧周期性地去向去抖缓冲区写入数据,而TDM侧不断地从去抖缓冲区读取数据,以恢复TDM码流。当两端的业务时钟存在差异时,导致去抖缓冲区的读写操作的速度存在差异。这种差异积累将导致两种可能的结果:缓冲区满,导致数据丢失;缓冲区空,导致TDM码流之间出现空隙。最终都表现为误码。自适应时钟恢复的最终功能就是使两端的业务时钟频率相同,从而避免上述风险和其它可能的错误。

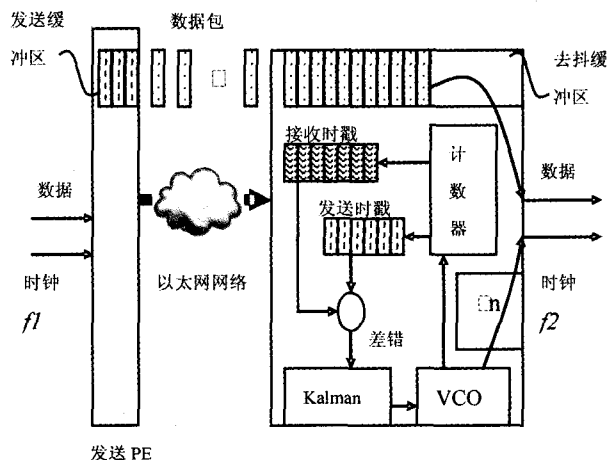


图2 KBLTS方法的功能结构

接收PE的VCO输出一个高频时钟(50MHz以上),它作为计数器的输入,同时分频后作为TDM的业务时钟 $f_2$ 。这里将一个以太网数据包携带的TDM载荷称为TDM单元(可以是一个或多个TDM时隙)。在以太网侧收到数据包时,对计数器进行采样并作为接收时戳 $RX_m$ ( $m=1,2,\dots$ ,下同)存入时戳缓冲区。另一方面,TDM开始发送一个TDM单元时,同样对计数器进行采样,并将采样值 $TX_m$ 作为发送时戳存入时戳缓冲区中。

在VCO的输出处于稳态的情况下,一组发送时戳构成一个等差数列。也就是说, $\Delta TX_m = TX_m - TX_{m-1}$ 是常数(以 $\Delta TX$ 表示)。

先考虑理想情况。在理想情况下,网络时延为0, $f_2$ 和 $f_1$ 可以看作是常量。

那么一组接收时戳同样构成一个等差数列,差值则是发送端发送两个相邻数据包的周期以接收端VCO的输出度量的结果。换句话说, $\Delta RX_m = RX_m - RX_{m-1}$ 也是一个常数(以 $\Delta RX$ 表示),它与发送端业务时钟频率 $f_1$ 成比例。

在两端业务时钟不相等时,两个差值之间存在差异,也就是说 $dRX_m = \Delta RX_m - \Delta TX_m \neq 0$ ,但它可以看成常数(以 $dRX$ 表示)。以 $dRX_m$ 控制VCO则可以使 $f_2 = f_1$ 。换句话说,理想情况下,收到两个数据包,利用这两个数据包的时戳即可以纠正两端业务时钟的偏差。

再讨论对于实际网络的情况。由文[13,14]可知,时钟的长期频偏极小,因此在一个相对较短的时间里, $f_2$ 和 $f_1$ 仍然可以看作是常量。但网络时延则是不能忽略的,而且基于统计复用的、异步的以太网的网络时延具有随机性,因此在接收端得到的接收时戳是失真的,并不能直接反映发送端的业务时钟信息。以 $\Delta R'X_m$ 表示这种情况下的 $\Delta RX_m$ ,则可得到 $\Delta R'X_m = \Delta RX_m + d_m$  (1)

(1)式中  $d_m$  表示网络时延对  $\Delta RX_m$  的影响。

以  $d'RX_m$  表示这种情况下的  $dRX_m$ , 则  
 $dR'X_m = dRX_m + d_m$  (2)

因此需要从一系列失真的时戳信息中恢复真实的时戳信息, 也就是根据  $d'RX_m$  得到  $dRX_m$ 。图 2 中的卡尔曼滤波器正是为实现这个功能而设计的。从卡尔曼 (Kalman) 滤波器输出的信号与  $dRX$  基本相等, 以此信号控制 VCO, 则可达  $f_2=f_1$  的目标。

### 3 离散卡尔曼滤波模型

卡尔曼滤波器解决的主要问题是: 试图估计离散时间控制过程中的状态量  $x$ 。

该离散时间控制过程可以用下面的差分方程描述:

$$y_k = Ay_{k-1} + Bu_k + w_{k-1} \quad (3)$$

该离散时间控制过程的观测量  $z$  可用下式表示:

$$z_k = Hy_k + v_k \quad (4)$$

(3)、(4)式中,  $y_k$  是  $n$  维矢量,  $z_k$  是  $m$  维矢量。  $A$  是  $n \times n$  矩阵。可选控制量  $u_k$  是一维向量。  $B$  是  $n \times l$  矩阵。  $H$  是  $m \times n$  矩阵。

随机变量  $w_k$  ( $n$  维矢量),  $v_k$  ( $m$  维矢量) 分别是过程和测量噪声, 它们分别服从(5)式和(6)式表示的正态分布:

$$p(w) \sim N(0, Q) \quad (5)$$

$$p(v) \sim N(0, R) \quad (6)$$

基于(3)、(4)式得到离散卡尔曼滤波的时间更新方程如(7)式和(8)式所示:

$$\hat{y}_k^- = A\hat{y}_{k-1} + Bu_k \quad (7)$$

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (8)$$

(7)、(8)式中  $\hat{y}_k^-$  和  $\hat{y}_{k-1}$  分别是第  $k$  步的先验估计值和第  $k-1$  步的后验估计值。  $P_k^-$  和  $P_{k-1}$  分别是第  $k$  步的先验估计方差和第  $k-1$  步后验估计方差。

同样基于(3)、(4)式得到离散卡尔曼滤波的测量更新方程如(9)~(11)式所示:

$$g_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1} \quad (9)$$

$$\hat{y}_k = \hat{y}_k^- + g_k(z_k - H\hat{y}_k^-) \quad (10)$$

$$P_k = (1 - g_k H) P_k^- \quad (11)$$

(9)~(11)式中  $n$  维矢量  $g_k$  是卡尔曼增益, 它作为调节因子可以使后验估计值的方差最小。基于时间更新方程和测量更新方程, 使用迭代算法能够使后验估计值  $\hat{y}_k$  逐步逼近其真实值。文[15]对卡尔曼滤波器进行了详细介绍和分析。

### 4 在 KBLTS 方法中应用卡尔曼滤波

由第 2 节的讨论可知, KBLTS 方法的关键是从一组失真的时戳中提取真实的  $dRX_m$ 。(12)、(13)两式可以描述接收时戳的性质:

$$dRX_m = dRX_{m-1} \quad (12)$$

$$z_m = d'RX_m = dRX_m + d_m \quad (13)$$

式中  $Z_m$  可看作是  $dRX_m$  的测量值。

由第 3 节的讨论可知, (12)式可以看作  $A=1, B=0, Q=0$  的卡尔曼过程方程。(13)式也和  $H=1$  时的测量方程很相似。但随机变量  $d_m$  遵从  $N(0, R)$  分布的假设则不一定成立。

由中心极限定理可知: 如果随机变量  $X_1, X_2, \dots, X_n$  相互独立, 服从同一分布, 且各随机变量的数学期望和方差分别为  $\mu$  和  $\sigma_2$ , 那么

$$Y_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{\sum_{m=0}^n x_m - n\mu}{\sqrt{n\sigma}} \right) \sim N(0, 1) \quad (14)$$

成立。也就是说, 当  $n \rightarrow \infty$  时,  $Y_n$  服从  $(0, 1)$  正态分布。

由于随机变量  $d_1, d_2, \dots, d_m$  是在同一网络上的同一时间段内的传输时延, 可看作独立同分布的随机变量。根据大数定理, 当  $n$  较大时, 其数学期望和方差可由下式近似表示:

$$\mu \approx (\sum_{m=0}^n d_m) / n \quad (15)$$

$$\sigma^2 \approx (\sum_{m=0}^n (d_m - \mu)^2) / n \quad (16)$$

由(14)~(16)式可得, 当  $n$  足够大时, 下式近似成立:

$$j_k = \sum_{m=kn}^{(k+1)n} d_m - n\mu \sim N(0, R) \quad (17)$$

令

$$M_k = \sum_{m=kn}^{(k+1)n} Z_m - n\mu \quad (18)$$

$$DRX_k = \sum_{m=kn}^{(k+1)n} dRX_m \quad (19)$$

在此基础上得到

$$DRX_k = DRX_{k-1} \quad (20)$$

$$M_k = DRX_k + j_k \quad (21)$$

(20)式符合卡尔曼过程方程的条件, (21)式也可看成  $H=1, j_k \sim N(0, R)$  的卡尔曼测量方程, 因此可以使用卡尔曼滤波算法。

于是得到 KBLTS 方法的卡尔曼滤波的时间更新方程如下:

$$DRX_k = DRX_{k-1} \quad (22)$$

$$P_k = P_{k-1} \quad (23)$$

得到 KBLTS 方法的卡尔曼滤波的测量更新方程如下:

$$G_k = P_k / (P_k + R) \quad (24)$$

$$DRX_k = DRX_k + G_k (M_k - DRX_k) \quad (25)$$

$$P_k = (1 - G_k) P_k \quad (26)$$

由(22)~(26)式简化得到

$$G_k = P_{k-1} / (P_{k-1} + R) \quad (27)$$

$$DRX_k = DRX_{k-1} + G_k (M_k - DRX_{k-1}) \quad (28)$$

$$P_k = (1 - G_k) P_{k-1} \quad (29)$$

根据时戳缓冲区中的信息得到  $P_0$  和  $R$ , 则利用迭代算法可以得到  $DRX_k$ , 进一步可得到  $dRX_m$ , 这就是我们需要得到的信息。

### 5 KBLTS 方法的实现和测试评估

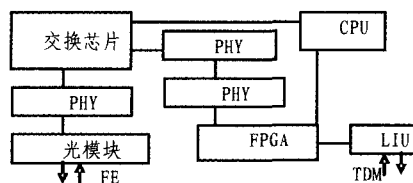


图 3 仿真设备的硬件结构

不失一般性, 这里以在百兆以太网网络上传送 E1 为代表设计仿真测试设备, 仿真设备的主要硬件结构如图 3 所示。在仿真设备中, E1 线路接口单元 (LIU, Line Interface Unit) 与 FPGA (Field-programmable gate array) 相连接, FPGA 通过百兆 PHY 连接到以太网交换芯片, 同时通过 PCI 总线连接到 CPU。以太网交换芯片也通过 PCI 总线与 CPU 连接, 同时通过百兆 PHY 与光模块连接。

FPGA 实现 PCI 接口功能、TDM 与以太网数据包的双向映射功能、通信功能、时戳生成功能以及时钟合成功能等。

FPGA 从 LIU 接收 TDM 信息并映射成以太网数据包, 并通过以太网交换芯片将数据包发送到以太网网络上。同时, FPGA 从以太网网络接收以太网数据包, 从以太网数据包中提取 TDM 数据并存入去抖缓冲区, 记录接收时戳信息。同时从去抖缓冲区取数据, 利用本地业务时钟发送到 LIU, 记录相应的发送时戳。发送时戳和接收时戳均由 100M 兆本地 VCO 驱动计数器得到。

CPU 则不断地从 FPGA 读取接收时戳和发送时戳信息, 利用软件基于卡尔曼滤波方法提取真实的  $dRX$ , 然后 CPU 将  $dRX$  写到 FPGA 的当前时戳差异寄存器中, 供 FPGA 调节时钟用。

FPGA 根据 CPU 写回的  $dRX$  结合数模转换和增益逻辑, 控制 VCO 输出本地业务时钟。

为了与其它自适应时钟方法比较, 同时实现了一种普通的缓冲区方法和一种普通的时戳方法, 这两种方法都采用硬件低通滤波器来过滤噪声。

仿真测试所用的网络拓扑如图 4 所示。

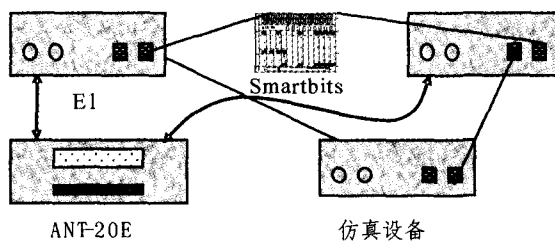


图 4 仿真测试拓扑图

图 4 中的仿真设备具有图 3 所示的功能结构。测试时用 Smartbits 输入随机背景流量, 以得到与实际网络近似的时延分布。测试仪表 ANT-20E 的两个 E1 接口分别连接到两端仿真设备的 E1 接口。

在 ANT-20E 发送数据时, 观察并记录 ANT-20E 对接收时钟的测量并记录。依次将仿真设备设置成普通缓冲区方法、普通时戳方法以及 KBLTS 方法并记录测试结果, 根据测试结果可得到图 5。

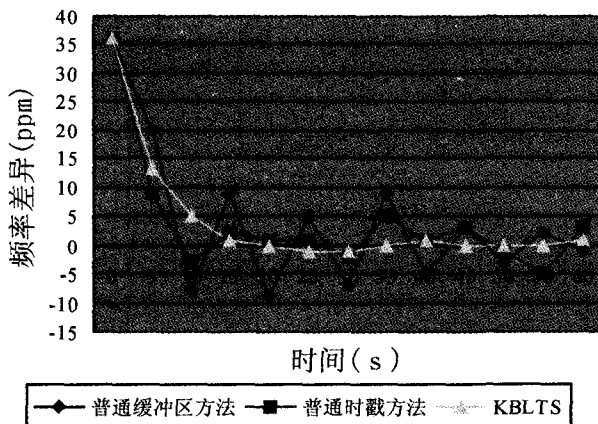


图 5 频率差异随时间变化的情况

图 5 中的横轴表示时间 (s), 纵轴表示随时间变化的两端频率差异。从图 5 可看出, 对于 KBLTS 方法来说, 在两端时钟初始频率差异接近 35ppm 时, 约 10s 后, 两端时钟频率基

本相同。而普通缓冲区方法锁定时间比 KBLTS 方法长得多, 普通时戳方法锁定的时间基本与 KBLTS 方法相当, 但不如 KBLTS 方法稳定。

**结论** 以太网电路仿真业务应用中, 自适应时钟方法比较适合于现有以太网。为克服基于缓冲区填充级方法锁定时间较长的不足, 以及基于时戳方法需要额外网络带宽的缺陷, 同时拓展自适应方法的灵活性, 提出了 KBLTS 方法。

KBLTS 采用对本地高频时钟采样分别得到接收和发送时戳, 使得不用在网络上传送时戳信息, 从而节省了对网络带宽的使用。采用卡尔曼滤波算法使得环路滤波可以选择用硬件实现或借助于软件实现, 应用起来更灵活。从图 5 可知, 采用 KBLTS 方法, 频率差异单调递减, 基本无抖动发生, 较快达到锁定点。

显然, KBLTS 方法可以克服锁定时间较长和需要额外网络带宽等不足, 具有良好的性能。相对于普通缓冲区方法和普通时戳方法来说, KBLTS 方法的综合性能更好。

## 参考文献

- 1 Metro Ethernet Forum(MEF)3. Circuit Emulation Service Definitions, Framework and Requirements in Metro Ethernet Networks, 2004
- 2 Metro Ethernet Forum(MEF) 8. Implementation Agreement for the Emulation of PDH Circuits over Metro Ethernet Networks, 2004
- 3 Xiao X, McPherson D, Pate P. IETF Rfc 3916, Requirements for Pseudo-Wire Emulation Edge-to-Edge (PWE3), 2004
- 4 Bryant S, Pate P. IETF Rfc 3985, Pseudo Wire Emulation Edge-to-Edge (PWE3) Architecture, 2005
- 5 Riegel M. IETF Rfc 4197, Requirements for Edge-to-Edge Emulation of Time Division Multiplexed (TDM) Circuits over Packet Switching Networks, 2005
- 6 International Telecommunication union, ITU-T G826. 1/Y. 1361. Ethernet over Transport aspects - Quality and availability targets: Timing and synchronization aspects in Packet Networks, 2006
- 7 International Telecommunication union, ITU-T G. 823. The control of jitter and wander within digital networks which are based on the 2048 kbit/s hierarchy, 2000
- 8 International Telecommunication union, ITU-T G. 824. The control of jitter and wander within digital networks which are based on the 1544 kbit/s hierarchy, 2000
- 9 Castel-Branco L, Nunes M S. Clock recovery for circuit emulation services over ATM broadband communications. Global Infrastructure for the Information Age. In: Proceedings of the International IFIP-IEEE Conference on, April 1996. 617~625
- 10 Fukada Y, Yasuda T, Komatsu S, et al. Adaptive Clock Recovery Method Utilizing Proportional-Integral-Derivative (PID) Control for Circuit Emulation, Communications. In: 2005 Asia-Pacific Conference on, Oct. 2005. 19~ 23
- 11 Fujikawa F, Serizawa Y. Experimental considerations on adaptive clock method for transmitting microprocessor-based current differential teleprotection signals in ATM networks Power. Engineering Society 1999 Winter Meeting, IEEE Volume 1, 31 Jan-4 Feb 1999. 229~ 234; vol 1. Digital Object Identifier 10. 1109/PESW. 1999. 747459
- 12 Aweya J, Montuno D Y, Ouellette M, et al. Clock synchronization for packet networks using a weighted least-squares error filtering technique and enabling circuit emulation service. International Journal of Communication Systems Early View
- 13 International Telecommunication union, ITU-T G. 811. Timing characteristics of primary reference clocks, 1997
- 14 International Telecommunication union, ITU-T G. 812. Timing requirements of slave clocks suitable for use as node clocks in synchronization networks, 1998
- 15 McCulloch J H. The Kalman Foundations of Adaptive Least Squares. <http://econ.ohio-state.edu/jhm/papers/KalmanAL.pdf>