

一种基于 DOCSIS 上行信道的自适应补偿定时同步算法

王 沁¹⁾ 郭艳飞¹⁾ 宋丽华^{1),2)} 杜立国¹⁾

¹⁾(北京科技大学信息工程学院 北京 100083)

²⁾(北方工业大学信息工程学院 北京 100144)

摘 要 基于 DOCSIS 规范,在分析 CM(Cable Modem)定时同步机制的基础上,文中首先提出了一种自适应补偿定时同步算法.通过准确预测定时误差发生时刻并及时给予误差补偿,该算法能够使 CM 在 HFC 网络上行 TDMA 信道上与 CMTS 建立精确的全局定时同步,为 CM 正确接入信道并实现业务传输提供了保证.其次,文中进一步将算法包含的乘除运算优化为加减运算,提高算法的通用性,降低其实现的复杂度.该算法目前已经应用在一款自主研发的 CM SoC 芯片中,实际环境测试结果表明该算法的定时精度为 DOCSIS 要求的 10.24 倍,并表现出优良的可靠性.

关键词 定时同步; HDTV; DOCSIS; CM; 混合同轴光纤

中图法分类号 TP302 DOI 号: 10.3724/SP.J.1016.2010.01305

An Adaptive Compensation Timing Synchronization Algorithm for DOCSIS Up Channel

WANG Qin¹⁾ GUO Yan-Fei¹⁾ SONG Li-Hua^{1),2)} DU Li-Guo¹⁾

¹⁾(Information Technology School, University of Science and Technology, Beijing 100083)

²⁾(Information Technology School, North China University of Technology, Beijing 100144)

Abstract In this paper, we firstly propose an adaptive compensation timing synchronization algorithm, which bases on the analysis of timing synchronization mechanism for CMs of the DOCSIS specifications. By accurately predicting the time of which timing errors come up and giving timing compensation in time, the proposed algorithm can make CMs acquire the global timing synchronization to CMTS in(not sure) the HFC upstream TDMA channel, and ensure the CMs access the channel and transmit services correctly. Then, we also describe an optimized implementation for the algorithm, which replaces all involved multiply-division operations by add-subtract operations. Thus, the optimized algorithm improves its universality and reduces its complexity. The proposed algorithm has been integrated in an independent design SoC chip for CM, the test results in real network conditions show that, by using the improved algorithm, timing precision of the CM is 10.24 times higher than the request of DOCSIS specifications, and has a good reliability.

Keywords timing synchronization; high definition television; DOCSIS; cable modem; HFC

收稿日期:2007-01-15;最终修改稿收到日期:2008-01-03. 本课题得到北京市科技重大项目“交互式有线数字电视信道传输核心技术开发”(京科技发[2002]188)、北京市科技产业化项目“SOC 设计服务及重点产品关键技术研究”(D0306008041021)资助. 王 沁,女,1961 年生,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机系统结构、专用集成电路与 SOC、宽带网络与通信、无线传感器网络. 郭艳飞(通信作者),男,1980 年生,博士研究生,主要研究方向为数字信号处理、集成电路设计、网络与通信嵌入式系统. E-mail:gyf2h@sohu.com. 宋丽华,女,1979 年生,博士研究生,主要研究方向为嵌入式系统设计、网络通信与协议. 杜立国,男,1982 年生,硕士研究生,主要研究方向为集成电路设计.

1 引言

HFC(Hybrid Fiber-Coax,混合同轴光纤)宽带接入是广电行业发展起来的一种重要宽带接入技术,其充分利用 HFC 网络覆盖范围广、高宽带,能同时传输语音、数据、视频等信息的特点,使其成为“三网融合”的最佳解决平台之一.利用 HFC 可以方便地开展基于 IP 的各种业务,如 VOIP、VOD、I-HDTV(交互式高清晰数字电视)、ITV(普通交互式有线电视)、高速 Web 浏览等业务,使 CATV 用户从 HFC 网络的多数据业务中获得真正的多媒体数字高速公路.目前负责制定 HFC 技术相关标准的组织主要有 3 家: DVB/DAVIC、IEEE 802.14 小组和 MCNS(多媒体电缆网络系统),其中最具有影响力的是 MCNS 制定的 DOCSIS 协议标准,该标准已经被正式纳入 ITU-T(ITU-TJ.112B)标准.

本文以 HFC 网络双向接入核心设备 CM(Cable Modem)的 SoC(System on Chip)芯片开发为背景,重点研究了 DOCSIS 协议 MAC 层上行信道接入的关键技术——定时同步技术,并提出了一种自适应补偿定时同步算法(Adaptive Compensation Timing Synchronization Algorithm, ACTSA),该算法能够高效、精准地实现上行时分复用(Time Division Multiple Access, TDMA)信道全局定时,为 CM 能够精确接入信道并实现数字业务奠定了基础.

本文第 2 节简要介绍 DOCSIS 上行信道接入机制;第 3 节详细阐述自适应补偿定时同步算法及其优化;第 4 节详细介绍算法的实现、测试及性能分析;最后为全文总结.

2 DOCSIS 上行信道接入机制分析

2.1 HFC 网络系统拓扑结构

双向 HFC 网络系统拓扑结构如图 1 所示,其主要由 3 部分组成:物理传输介质(光纤或同轴)、

若干 CM 和一个电缆调制解调终端系统(Cable Modem Termination System, CMTS). CMTS 是 HFC 网络的中央控制机构. HFC 网络采用频分复用技术,将 5~1000MHz 的频段分割分为上行和下行信道,5~65MHz 为上行信道,87~1000MHz 为下行信道. HFC 网络的下行信道是一对多的树型分支结构, CMTS 是该方向上的唯一发送端,其以 MPEG-2 格式将各种数据和管理信息广播给下行信道上的 CM. 上行信道是多对一的总线结构,多个 CM 共享同一个上行信道,在 CMTS 的调度下以 TDMA 的方式接入信道.

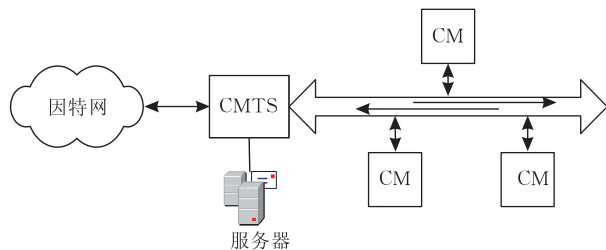


图 1 HFC 网络系统拓扑结构

2.2 DOCSIS 上行信道带宽分配机制

为了解决上行共享信道的资源占用和带宽分配问题,DOCSIS 规范定义了 MAC 层协议来合理分配上行带宽资源,实现 CM 的随机接入,并解决竞争冲突.其采用 TDMA 技术将上行信道模型化为一连串的微时隙流,并采用上行带宽分配表 MAP 管理机制,将未来一段时间内的上行带宽微时隙分配情况描述在 MAP 管理报文中,通过下行信道广播给共享同一上行信道的 CM. MAP 定义了 3 类基本微时隙,如图 2 所示.维护时隙用于测距,其中初始维护时隙为 CM 竞争接入网络提供传输机会,站维护时隙为 CM 进行常规网络维护及获取定时偏移提供传输机会.数据预留时隙为指定 CM 提供专用上行数据传输机会.竞争时隙为 CM 争用上行信道提供传输机会.其中,在数据预留时隙和站维护时隙 CM 独占上行信道不会产生传输冲突.而在竞争时隙和初时维护时隙多个 CM 争用信道传输,因此

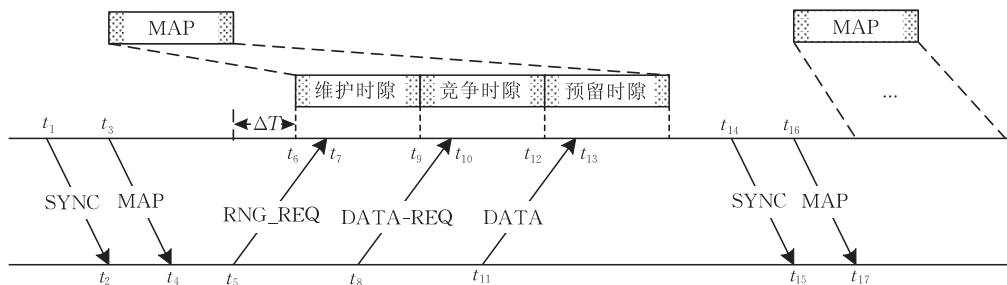


图 2 上行信道带宽分配模型

会引起冲突,由于 HFC 网络上、下行信道在频段上相互隔离,处于分支节点处的 CM 无法监听上行信道的信号,也就不能采用以太网的载波监听多路访问/冲突检测(CSMA/CD)机制,而是采用二进制指数退避竞争算法来解决传输冲突。

2.3 DOCSIS 上行信道定时同步机制

CM 为了识别 MAP 中描述的带宽分配微时隙,并使其上行传输能够在指定的微时隙内到达 CMTS,CM 必须在本地与 CMTS 建立精确的定时同步,如此 CM 需要完成如下两步工作:(1)建立全局定时基准.CMTS 周期性地在下行信道广播时间戳(TimeStamp,TS)同步报文 SYNC(见图 2),CM 必须将本地实际时间与收到的时间戳相比较,并调整它们各自的定时基准。(2)获得定时偏移.CM 必须在初时维护和站维护时隙进行测距,以获得定时偏移 ΔT 解决信道延迟补偿.如图 2 所示,为使测距请求(RNG-REQ)、数据请求(DATA-REQ)以及上行数据帧(DATA)能够在指定时隙内到达 CMTS,CM 必须在本地定时基准 t_5 、 t_8 和 t_{11} 时刻提前 ΔT 开始其传输.关于测距机制详细介绍参见文献[1].

3 全局定时同步算法

3.1 全局定时误差分析

全局定时基准建立过程中 CMTS 的 TS 表示的是这样一瞬间的定时计数状态:时间同步报文 SYNC 的第一字节从下行传输汇集层到物理媒介依赖子层时,CMTS 内以 10.24MHz 时钟为基准的 32 位计数器的计数状态.理想情况下,CM 同样建立 10.24MHz 的 32 位定时计数器,并根据收到的 TS 更新该定时器便可建立全局定时基准.设 t' 为某次 TS 到达 CM 时刻,此时 CMTS 和 CM 全局定时器计数值分别 T_{cmts} 和 T_{cm} ,上下行的传输及物理层处理延迟分别为 ΔT_u 和 ΔT_d ,测距获的定时偏移 ΔT ,则有

$$T_{\text{cmts}} = T_{\text{cm}} + \Delta T_d \quad (1)$$

$$\Delta T = \Delta T_u + \Delta T_d \quad (2)$$

因此由式(1)和式(2)及图 2 可知,CM 通过定时偏移 ΔT 便可将其传输与正确的微时隙界限相对齐。

但问题是 CM 与 CMTS 中同样以 10.24MHz 驱动的两个全局定时器真的能同步计数吗? CMTS 与 CM 工作在两个完全不同的物理环境中.设 CMTS 和 CM 的环境参数集分别为 $P_{\text{cmts}}(y_1, y_2, \dots, y_m)$ 和 $P_{\text{cm}}(x_1, x_2, \dots, x_m)$,则有

$$P_{\text{cmts}}(y_1, y_2, \dots, y_m) \neq P_{\text{cm}}(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (3)$$

在信道传输中,由晶振精度、电压、温度等寄生参数引起的时钟漂移问题往往是研究的重点.因此,由式(3)需要怀疑式(1)的可靠性。

由 DOCSIS 规范知相邻两次 SYNC 到达时间间隔 I_{sy} 最大值为 200ms.为分析时钟漂移引起的 CM 定时同步问题,本文首先对此间隔建立局部定时误差模型(Partial Timing Error Model, PTEM),其定义如下:

(1)设标准参考时钟频率和周期分别为 $f_s = 10.24\text{MHz}$, $T_s = \frac{1}{f_s} = \frac{1}{10.24\text{MHz}}\text{s}$. CMTS 的时钟漂移为 $clk_{\text{cmts_skew}} = 0$, ΔT_d 相对稳定,则 CM 可将 SYNC 中的 TS 作为精确的定时参考基准,CM 定时误差皆归咎于 CM 时钟漂移 $clk_{\text{cm_skew}} \neq 0$ 引起. CMTS 与 CM 全局定时器时钟频率分别为 $f_{\text{cmts}} = f_s$ 和 $f_{\text{cm}} = (f_s \pm \Delta f)\text{MHz}$,其中 Δf 为频率偏移量。

(2)设 P_{cmts} 和 P_{cm} 相对稳定,即有 $f_{\text{cm}}/f_{\text{cmts}} = C$, C 为常量。

(3)设相邻两次 TS 到达时刻分别为 A_1 和 A_2 ,时间间隔为 $I_{sy} = A_2 - A_1$ 。

(4)设 $s(t)$ 和 $r(t)$ 分别为 CMTS 和 CM 定时器在时刻 t 的计数值函数, $t \in [A_1, A_2]$.实际上 $s(t)$ 和 $r(t)$ 只在离散时间序列 $\{t_i\}$ 上取值有效, $t_i \in \{A_1, A_1 + T_s, \dots, A_1 + i * T_s, \dots\}$, $i = 0, 1, \dots, \left\lfloor \frac{I_{sy}}{T_s} \right\rfloor$.为方便分析,本文在 PTEM 中暂将 $s(t)$ 和 $r(t)$ 视作连续函数进行分析。

由上述模型定义可知,函数 $s(t)$ 和 $r(t)$ 可按如下线性关系描述:

(1)当 $t = A_1$ 时,TS 到达其值为 t_{s_0} ,据此 CM 置 $r(A_1) = t_{s_0}$ 。

(2)当 $A_1 < t < A_2$ 时有

$$r(t) = t_{s_0} + f_{\text{cm}} \times (t - A_1) + \varepsilon(t) \quad (4)$$

其中, $\varepsilon(t)$ 为随机噪声引起的定时偏差,假设此随机噪声为高斯噪声,其数学期望 $E[\varepsilon(t)] = 0$,方差 $\text{Var}[\varepsilon(t)] = \sigma_\varepsilon^2$,且在时间上具有独立性即

$$E[\varepsilon(t)\varepsilon(t+\phi)] = 0, \Psi \neq 0.$$

(3)相应的,CMTS 定时器计数值函数 $s(t)$ 为 $s(t) = f_{\text{cmts}} \times [(t - A_1) + \Delta T_d] + t_{s_0}$, $t \in [A_1, A_2]$

(5)

由文献[2]知测距通过调整 CM 的 ΔT 使其看起来正好位于 CMTS 附近,因此 PTEM 中由 ΔT_d 引入的固定定时误差,可在测距过程中由 ΔT 补偿.同时为简化分析,忽略随机噪声对定时的影响.因

此,对式(4)和(5)可做如下约舍:

(a) 舍去 ΔT_d .

(b) 令 $\sigma_\varepsilon^2 \rightarrow 0$, 舍去随机噪声引入的 $\varepsilon(t)$ 因子.

则式(4)、(5)的简化形式为

$$\begin{aligned} r(t) &= f_{\text{cm}} \times (t - A_1) + ts_0, \\ s(t) &= f_{\text{cm}_{\text{ts}}} \times (t - A_1) + ts_0, \quad t \in [A_1, A_2] \end{aligned} \quad (6)$$

令 $T_e(t)$ 为 t 时刻 CM 的定时误差, 则有

$$\begin{aligned} T_e(t) &= s(t) - r(t) = (f_{\text{cm}_{\text{ts}}} - f_{\text{cm}}) \times (t - A_1) \\ &= \Delta f \times t, \quad t \in [A_1, A_2] \end{aligned} \quad (7)$$

由式(7)描述的 CM 定时误差如图 3 所示, 根据 $\Delta f > 0$, $\Delta f < 0$, $\Delta f = 0$ 分为 3 种情况.

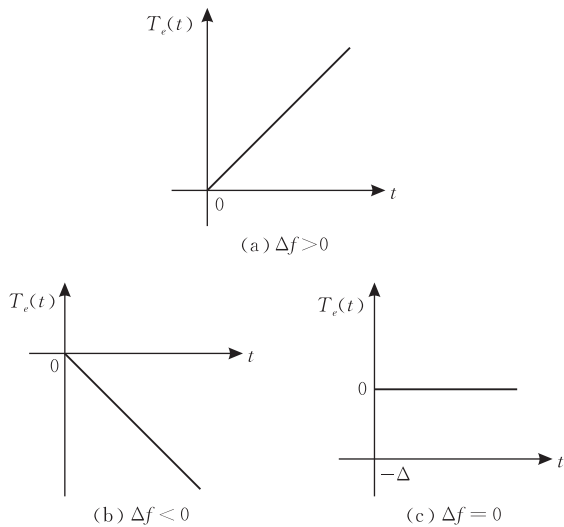


图 3 CM 定时误差

为解决网络发送端和接收端的时钟同步问题, 文献[4-5]详细介绍了基于 TS 的各种同步调整算法, 如 LRT (Linear Regression Algorithm)、DLST (Discounted Least-Squares Algorithm)、DST/AST (Direct Smoothing Algorithm/Adaptive Smoothing Algorithm) 等等, 这些算法将同步问题转化为根据历史定时误差信息对将来估值问题, 通过对 TS 进行 k 次采样, 并将误差序列 $T_e(t)$ 输入环路滤波 LF (Loop Filter) 器计算频率误差 Δf , 以此控制压控振荡器 (Voltage Controlled Oscillator, VCO) 或数控振荡器 (Digitally Controlled Oscillator, DCO) 调整本地频率. 使用上述算法时钟频率误差的数学期望最终可收敛为 0, 算法精度高. 但是, 这些算法在解决 PTEM 描述的定时误差上具有如下缺点:

(1) 算法需连续采样 k 个 T_e 以估计未知参数 b_i ($i=1, 2, \dots, n$), 运算时间代价较大.

(2) 算法实现涉及相位检测器、LF、VCO/DCO, 硬件实现复杂, 规模代价高.

(3) 一次频率同步调整周期为 k 个 TS 周期, 调

整周期长, 收敛速度慢.

(4) 算法调整的对象是接收端时钟频率, 而非其定时器输出值.

由 DOCSIS 知 CM 定时器在任意时刻 t 都需与 CMTS 精确同步, 以此保证其随机接入时同正确的微时隙界限相对齐, 不可能允许连续 k 个 Isy 的非精确定时. 同时, 基于硬件实现复杂度和规模考虑, 下面章节中本文提出了一种自适应补偿定时同步算法.

3.2 自适应补偿定时同步算法

不同于文献[4-5], 本文将研究的重点定位于 Isy 内并提出新算法 ACTSA, 该算法能预测定时误差将发生时刻并及时给予补偿, 以此实现任意 Isy 内任意时刻 CM 同 CMTS 的精确定时同步.

在上节 PTEM 基础上将定时误差模型扩展为连续 Isy 上的全局定时误差模型 (Global Timing Error Model, GTEM), 模型扩展定义如下:

(1) 设 TS 到达时刻序列为 $\{T_k: k=0, 1, 2, \dots\}$, 其中 k 表示第 $k+1$ 个同步报文的到达.

(2) 设 $\{T_k^{(m)}: m=1, 2, \dots\}$ 为 (T_k, T_{k+1}) 上的定时补偿时刻序列, 不妨令 $T_k^{(0)} = T_k$.

(3) 设 $\{f_{\text{cm}}^{(k-1)}: k=1, 2, \dots\}$ 为 CM 在 (T_{k-1}, T_k) 上的定时器时钟频率, $\{\Delta f_{\text{cm}}^{(k)}: k=1, 2, \dots\}$ 为 (T_{k-1}, T_k) 和 (T_k, T_{k+1}) 上 $f_{\text{cm}}^{(k-1)}$ 与 $f_{\text{cm}}^{(k)}$ 差, 并有 $\Delta f_{\text{cm}}^{(k)} = |f_{\text{cm}}^{(k)} - f_{\text{cm}}^{(k-1)}| < \frac{1}{200\text{ms}} = 5\text{Hz}$, 但 $f_{\text{cm}}^{(k+1)}$ 和 $f_{\text{cm}}^{(k-1)}$ 间并无此频率误差约束. 令 $f_{\text{cm}}^{(-1)}$ 为 $t \in (0, T_0]$ 上 CM 定时器时钟频率.

(4) 设 $\Delta \text{comp}(T_k^{(m)})$ 为定时补偿时刻点 $T_k^{(m)}$ 对应的定时补偿值, $Eval(t)$ 为 (T_k, t) 上所有 $\Delta \text{comp}(T_k^{(m)})$ 之和.

基于上述 GTEM 模型假设的 ACTSA 详细推导过程如下:

(1) 对于 $t \in \{T_k, k=0, 1, 2, \dots\}$ 有 $Eval(t) = 0$.

(2) 在 GTEM 下 CM 定时器计数值 $r(t)$ 表达式如下:

$$r(t) = \begin{cases} 0, & t = 0 \\ f_{\text{cm}}^{(k)} \times (t - T_k) + s(T_k), & t \in (T_k, T_{k+1}], \\ f_{\text{cm}}^{(-1)} \times t, & t \in (0, T_0] \end{cases} \quad k=0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

(3) 对于 $t \in (T_0, T_1)$ 由式(7)可得

$$\begin{aligned} T_e(t) &= (f_{\text{cm}_{\text{ts}}} - f_{\text{cm}}^{(0)}) \times (t - T_0) \\ &= f_{\text{cm}_{\text{ts}}} \times (t - T_0) - f_{\text{cm}}^{(0)} \times (t - T_0) \end{aligned} \quad (9)$$

由式(6)、(8)可得

$$f_{\text{cm}_{\text{ts}}} \times (T_1 - T_0) = s(T_1) - s(T_0) \quad (10)$$

$$f_{\text{cm}}^{(0)} \times (T_1 - T_0) = r(T_1) - s(T_0) \quad (11)$$

则由式(10)、(11)得

$$f_{\text{cm}} - f_{\text{cm}}^{(0)} = \frac{s(T_1) - r(T_1)}{T_1 - T_0} \quad (12)$$

将式(12)代入式(9)得

$$T_e(t) = \frac{s(T_1) - r(T_1)}{T_1 - T_0} (t - T_0) \quad (13)$$

上式表明当 $t \in (T_0, T_1)$ 时 $T_e(t)$ 是斜率为 $\frac{s(T_1) - r(T_1)}{T_1 - T_0}$ 的直线段。

(4) 由 GTEM 假设(3)可知, (T_k, T_{k+1}) 上的定时误差可根据 (T_{k-1}, T_k) 上的定时误差预测, 因此由式(13)可估计 (T_1, T_2) 上的定时误差 $T_e(t)$ 。在实际中 CMTS 和 CM 的定时器为递增单位为 1 的离散计数器, 因此为使 CM 同 CMTS 定时精确同步, 算法期望任意时刻 t 定时误差 $|T_e(t)| \leq 1$, 这等于将问题转化为: 令 $|\Delta \text{comp}(T_k^{(m)})| = 1$, 转而求解准确的定时补偿时刻 $\{T_k^{(m)}; m=1, 2, \dots\}$ 。由此当 $t \in (T_1^{(0)}, T_2)$ 时有

$$T_e(t) = \frac{s(T_1) - r(T_1)}{T_1 - T_0} \times (t - T_1^{(0)}) \quad (14)$$

则待求误差补偿时刻 $T_1^{(1)}$ 满足

$$\left| \frac{s(T_1) - r(T_1)}{T_1 - T_0} \times (T_1^{(1)} - T_1^{(0)}) \right| = |\Delta \text{comp}(T_1^{(1)})| = 1 \quad (15)$$

对于 $Eval(t)$, 当 $t \in (T_1^{(0)}, T_1^{(1)})$ 时 $Eval(t) = Eval(T_1^{(0)})$, 当 $t = T_1^{(1)}$ 时有

$$\begin{aligned} Eval(T_1^{(1)}) &= Eval(T_1^{(0)}) + \Delta \text{comp}(T_1^{(1)}) \\ &= 0 + \Delta \text{comp}(T_1^{(1)}) \end{aligned} \quad (16)$$

其中, $\Delta \text{comp}(T_1^{(1)}) = \text{sgn}(s(T_1) - r(T_1))$, $\text{sgn}()$ 为符号函数。

(5) 当 $t \in (T_1^{(m-1)}, T_2)$, $m=1, 2, 3, \dots$ 时, 由式(14)~(16)同理可得

$$T_e(t) = \frac{s(T_1) - r(T_1)}{T_1 - T_0} \times (t - T_1^{(m-1)}) \quad (17)$$

误差补偿时刻 $T_1^{(m)}$ 满足

$$\left| \frac{s(T_1) - r(T_1)}{T_1 - T_0} \times (T_1^{(m)} - T_1^{(m-1)}) \right| = 1 \quad (18)$$

当 $t \in (T_1^{(m-1)}, T_1^{(m)})$ 时有 $Eval(t) = Eval(T_1^{(m-1)})$, 当 $t = T_1^{(m)}$ 时有

$$Eval(T_1^{(m)}) = Eval(T_1^{(m-1)}) + \Delta \text{comp}(T_1^{(m)}),$$

其中

$$\Delta \text{comp}(T_1^{(m)}) = \text{sgn}(s(T_1) - r(T_1)) \quad (19)$$

(6) 推广为 GTEM 中一般情况, 对于 $t \in (T_k^{(m-1)}, T_{k+1})$, 由式(17)~(19)可得

$$T_e(t) = \frac{s(T_k) - r(T_k)}{T_k - T_{k-1}} (t - T_k^{(m-1)}) \quad (20)$$

误差补偿时刻 $T_k^{(m)}$ 满足

$$\left| \frac{s(T_k) - r(T_k)}{T_k - T_{k-1}} \times (T_k^{(m)} - T_k^{(m-1)}) \right| = 1 \quad (21)$$

当 $t \in (T_k^{(m-1)}, T_k^{(m)})$ 时有 $Eval(t) = Eval(T_k^{(m-1)})$, 当 $t = T_k^{(m)}$ 时有

$$Eval(T_k^{(m)}) = Eval(T_k^{(m-1)}) + \Delta \text{comp}(T_k^{(m)}),$$

其中

$$\Delta \text{comp}(T_k^{(m)}) = \text{sgn}(s(T_k) - r(T_k)) \quad (22)$$

设 $tm_{\text{cm}}(t)$ 为 t 时刻经上述算法校正后的 CM 定时器输出值, 则有

$$tm_{\text{cm}}(t) = R(t) + Eval(t), \quad t \in [0, +\infty) \quad (23)$$

推导至此, 算法分别给出了定时误差计算方程(20)、定时补偿时刻计算方程(21)、定时补偿值累积量计算方程(22)以及校正定时输出计算方程(23)。由于算法可根据 (T_{k-1}, T_k) 阶段的定时误差自动调节式(20)的斜率以反映 $f_{\text{cm}}^{(k-2)}$ 到 $f_{\text{cm}}^{(k-1)}$ 的变化, 从而正确预测 (T_k, T_{k+1}) 阶段的定时误差, 因此称该算法具有“自适应性”。由算法推导过程可知, 在任意时刻 t 都有 $|s(t) - tm_{\text{cm}}(t)| \leq 1, t \in [0, +\infty)$, 即算法保证了 CM 同 CMTS 在全局定时上的精确同步。

3.3 自适应补偿定时同步算法优化

上节 GTEM 下给出的 ACTSA 适合连续定义域 $t \in [0, +\infty)$ 上的定时误差补偿, 但实际中 CM 的定时器是在周期为 $\frac{1}{f_{\text{cm}}}$ 的脉冲边沿(本文假定为上升沿)驱动下工作, 这样由式(21)得到的定时补偿时刻不一定恰好与该脉冲的上升沿时刻(离散时间点)对齐。针对该问题本文将把 GTEM 转化为离散定时误差模型(Global Dispersion Timing Error Model, GDTEM), 并推导 GDTEM 下的 ACTSA 算法。该 GDTEM 定义如下:

(1) n 表示系统启动到当前时刻定时器已经历的脉冲数。

(2) 设定时器在脉冲上升沿检测 TS, 则 TS 到达时所对应的 n 值序列为 $\{N_k; k=0, 1, 2, \dots\}$, 该序列对应于 GTEM 中的 $\{T_k\}$, 其中 k 表示第 $k+1$ 个 TS 的到达。

(3) 设 $\{N_k^{(m)}; m=1, 2, \dots\}$ 为 (N_{k-1}, N_k) 上定时补偿点的 n 值序列, 令 $N_k^{(0)} = N_k$ 。

(4) 设 $\{F_{\text{cm}}^{(k-1)}; k=1, 2, \dots\}$ 为 (N_{k-1}, N_k) 上定时器时钟频率, $\Delta F_{\text{cm}}^{(k)} = \Delta f_{\text{cm}}^{(k)}$ 同样具有 GTEM 中(3)定义的约束。

(5) 设 $\Delta \text{COMP}(N_k^{(m)})$ 为 $N_k^{(m)}$ 点的定时补偿

值, $E_{\text{VAL}}(n)$ 为 (N_k, n) 上所有 $\Delta\text{COMP}(N_k^{(m)})$ 之和.

(6) 设 $S(N_k)$ 为 N_k 点对应的 TS 值, $R(n)$ 为 CM 定时器计数值, $TNe(n)$ 为定时器误差.

基于上述 GDTEM 离散模型的 ACTSA 算法推导过程如下:

(1) 对于 $n \in \{N_k, k=0, 1, 2, \dots\}$ 有 $E_{\text{VAL}}(n) = 0$.

(2) GDTEM 下 CM 定时器计数值 $R(n)$ 表达式如下:

$$R(n) = \begin{cases} 0, & n = 0 \\ R(n-1) + 1, & n \notin \{N_k + 1, k=0, 1, 2, \dots\} \\ S(N_k) + 1, & n \in \{N_k + 1, k=0, 1, 2, \dots\} \end{cases}$$

(3) 对于 $n \in (N_0, N_1]$, 设 CM 定时器第 n 个周期上升沿时刻为 t_n , 则由式(13)可得

$$\begin{aligned} TNe(n) &= T_e(t_n) = \frac{s(T_1) - r(T_1)}{T_1 - T_0} \times (t_n - T_0) \\ &= \frac{s(T_1) - r(T_1)}{(N_1 - N_0) \times \frac{1}{F_{\text{cm}}^{(0)}}} \times \left[(n - N_0) \times \frac{1}{F_{\text{cm}}^{(0)}} \right] \\ &= \frac{S(N_1) - R(N_1)}{(N_1 - N_0)} \times (n - N_0) \\ &= \frac{S(N_1) - R(N_1)}{N_1 - N_0} \times (n - N_0) \end{aligned} \quad (24)$$

(4) 对于 $n \in (N_1^{(0)}, N_2]$, 由式(24)可得

$$TNe(n) = \frac{S(N_1) - R(N_1)}{N_1 - N_0} \times (n - N_1^{(0)}) \quad (25)$$

GDTEM 下在求 $(N_k^{(m-1)}, N_{k+1}]$ 上 $N_k^{(m)}$ 时不能直接套用式(21), 因为 CM 发生定时误差等于 1 的时刻点不一定恰好与 n 对齐. 本文在 GDTEM 下采用延迟补偿策略, 即将补偿点延迟到定时误差等于 1 的时刻点后最近的一个 n 点, 则 $(N_1^{(0)}, N_2]$ 上 $N_1^{(1)}$ 的计算方程如下:

$$N_1^{(1)} = \min_n \left\{ n : \left| \frac{S(N_1) - R(N_1)}{N_1 - N_0} \times (n - N_1^{(0)}) \right| \geq 1 \right\} \quad (26)$$

对于 $E_{\text{VAL}}(n)$, 当 $n \in (N_1^{(0)}, N_1^{(1)}]$ 时有 $E_{\text{VAL}}(n) = E_{\text{VAL}}(n-1) = E_{\text{VAL}}(N_1^{(0)})$, 当 $n = N_1^{(1)}$ 时有

$$\begin{aligned} E_{\text{VAL}}(N_1^{(1)}) &= E_{\text{VAL}}(N_1^{(1)} - 1) + \Delta\text{COMP}(N_1^{(1)}) \\ &= E_{\text{VAL}}(N_1^{(0)}) + \Delta\text{COMP}(N_1^{(1)}) \end{aligned} \quad (27)$$

其中, $\Delta\text{COMP}(N_1^{(1)}) = \text{sgn}(S(N_1) - R(N_1))$.

(5) 对于 $n \in (N_1^{(1)}, N_2]$, $N_1^{(2)}$ 的求解方程如下:

$$\begin{aligned} N_1^{(2)} &= \min_n \left\{ n : \left[\frac{S(N_1) - R(N_1)}{N_1 - N_0} \times (N_1^{(1)} - N_1^{(0)}) - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \text{sgn}(S(N_1) - R(N_1)) \right] + \right. \\ &\quad \left. \left[\frac{S(N_1) - R(N_1)}{N_1 - N_0} \times (n - N_1^{(1)}) \right] \right| \geq 1 \left. \right\} \end{aligned}$$

$$= \min_n \left\{ n : \left| \frac{S(N_1) - R(N_1)}{N_1 - N_0} \times (n - N_1^{(0)}) - \text{sgn}(S(N_1) - R(N_1)) \right| \geq 1 \right\} \quad (28)$$

其中 $\frac{S(N_1) - R(N_1)}{N_1 - N_0} \times (N_1^{(1)} - N_1^{(0)}) - \text{sgn}(S(N_1) - R(N_1))$ 项为由于定时误差补偿点延迟到 $N_1^{(1)}$ 而造成的累积补偿误差.

对于 $E_{\text{VAL}}(n)$, 当 $n \in (N_1^{(1)}, N_1^{(2)}]$ 时有 $E_{\text{VAL}}(n) = E_{\text{VAL}}(n-1) = E_{\text{VAL}}(N_1^{(1)})$, 当 $n = N_1^{(2)}$ 时有

$$\begin{aligned} E_{\text{VAL}}(N_1^{(2)}) &= E_{\text{VAL}}(N_1^{(2)} - 1) + \Delta\text{COMP}(N_1^{(2)}) \\ &= E_{\text{VAL}}(N_1^{(1)}) + \Delta\text{COMP}(N_1^{(2)}) \end{aligned} \quad (29)$$

其中, $\Delta\text{COMP}(N_1^{(2)}) = \text{sgn}(S(N_1) - R(N_1))$.

(6) 由数学归纳法可得, 对于 $n \in (N_1^{(m-1)}, N_2]$ 有

$$\begin{aligned} N_1^{(m)} &= \min_n \left\{ n : \left| \frac{S(N_1) - R(N_1)}{N_1 - N_0} \times (n - N_1^{(0)}) - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. (m-1) \times \text{sgn}(S(N_1) - R(N_1)) \right| \geq 1 \right\} \end{aligned} \quad (30)$$

对于 $E_{\text{VAL}}(n)$, 当 $n \in (N_1^{(m-1)}, N_1^{(m)}]$ 时有 $E_{\text{VAL}}(n) = E_{\text{VAL}}(n-1) = E_{\text{VAL}}(N_1^{(m-1)})$, 当 $n = N_1^{(m)}$ 时有

$$\begin{aligned} E_{\text{VAL}}(N_1^{(m)}) &= E_{\text{VAL}}(N_1^{(m)} - 1) + \Delta\text{COMP}(N_1^{(m)}) \\ &= E_{\text{VAL}}(N_1^{(m-1)}) + \Delta\text{COMP}(N_1^{(m)}), \end{aligned}$$

其中 $\Delta\text{COMP}(N_1^{(m)}) = \text{sgn}(S(N_1) - R(N_1))$.

(7) 推广为 GDTEM 下最一般形式, 对于 $n \in (N_k^{(m-1)}, N_{k+1}]$ 有

$$TNe(n) = \frac{S(N_k) - R(N_k)}{N_k - N_{k-1}} \times (n - N_k^{(0)}) \quad (31)$$

$$\begin{aligned} N_k^{(m)} &= \min_n \left\{ n : \left| \frac{S(N_k) - R(N_k)}{N_k - N_{k-1}} \times (n - N_k^{(0)}) - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. (m-1) \times \text{sgn}(S(N_k) - R(N_k)) \right| \geq 1, \right. \\ &\quad \left. n \in (N_k^{(m-1)}, N_{k+1}) \right\} \end{aligned} \quad (32)$$

对于 $E_{\text{VAL}}(n)$, 当 $n \in (N_k^{(m-1)}, N_k^{(m)}]$ 时有 $E_{\text{VAL}}(n) = E_{\text{VAL}}(n-1) = E_{\text{VAL}}(N_k^{(m-1)})$, 当 $n = N_k^{(m)}$ 时有

$$\begin{aligned} E_{\text{VAL}}(N_k^{(m)}) &= E_{\text{VAL}}(N_k^{(m)} - 1) + \Delta\text{COMP}(N_k^{(m)}) \\ &= E_{\text{VAL}}(N_k^{(m-1)}) + \Delta\text{COMP}(N_k^{(m)}) \end{aligned} \quad (33)$$

其中, $\Delta\text{COMP}(N_k^{(m)}) = \text{sgn}(S(N_k) - R(N_k))$.

设 $TM_{\text{cm}}(n)$ 为 n 时刻经上述 GDTEM 下 ACTSA 校正后的 CM 定时输出值, 则有

$$TM_{\text{cm}}(n) = R(n) + E_{\text{VAL}}(n), \quad n \in [0, +\infty) \quad (34)$$

通过上述连续定时误差模型到离散定时误差模型的 ACTSA 推导变换, 得到了离散模型下的定时误差计算方程(31)、定时补偿时刻计算方程(32)、定时补偿值累积量计算方程(33)以及校正定时输出计算方程(34).

但是,算法实现时式(31)、(32)表示的计算方程并不完美,因为它们涉及到硬件以及嵌入式系统实现所不期望的乘法和除法运算.为了消除 ACTSA 中的乘除运算使其能更广泛、更便捷地应用到实际系统实现中,本文将对上述计算结果进行优化.

对于 $n \in (N_k^{(m-1)}, N_{k+1}]$,由式(32)有

$$N_k^{(m)} = \min_n \left\{ n : \left| \left[(S(N_k) - R(N_k)) \times (n - N_k) \right] - \left[(N_k - N_{k-1}) \times (m-1) \times \text{sgn}(S(N_k) - R(N_k)) \right] \right| \geq (N_k - N_{k-1}) \right\} \Rightarrow :$$

$$N_k^{(m)} = \min_n \left\{ n : \left| \sum_{i=N_k}^n [S(N_k) - R(N_k)] - \sum_{j=0}^{m-1} [(N_k - N_{k-1}) \times \text{sgn}(S(N_k) - R(N_k))] \right| \geq (N_k - N_{k-1}) \right\} \quad (35)$$

通过优化式(32)计算所需的乘除运算在式(35)中消失了,算法得到了更为简便的计算方程.由式(35)可知,计算 $(N_k, N_{k+1}]$ 上第 m 个定时补偿时刻只需知道 $(N_{k-1}, N_k]$ 上 N_k 点的定时误差值 $S(N_k) -$

$R(N_k)$ 以及第 k 和第 $k+1$ 个 TS 到达对应的定时时间间隔 $N_k - N_{k-1}$ 即可.设式(35)中决定补偿时刻点 $N_k^{(m)}$ 的因子为 $Estep(N_k^{(m)})$ 称为定时补偿步长,则有

$$Estep(N_k^{(m)}) = \sum_{i=N_k}^n [S(N_k) - R(N_k)] - \sum_{j=0}^{m-1} [(N_k - N_{k-1}) \times \text{sgn}(S(N_k) - R(N_k))], \quad m=1, 2, \dots \quad (36)$$

至此,ACTSA 给出了 CM 进行定时补偿所需的全部计算方程式,这些计算方程式不仅能够使 CM 精确同步于 CMTS,而且能够方便地适用于硬件及嵌入式系统实现.

4 算法实现、测试及性能分析

下面本文将给出 ACTSA 的具体实现步骤,并对其进行测试和性能分析.算法计算流程如图 4 所示.

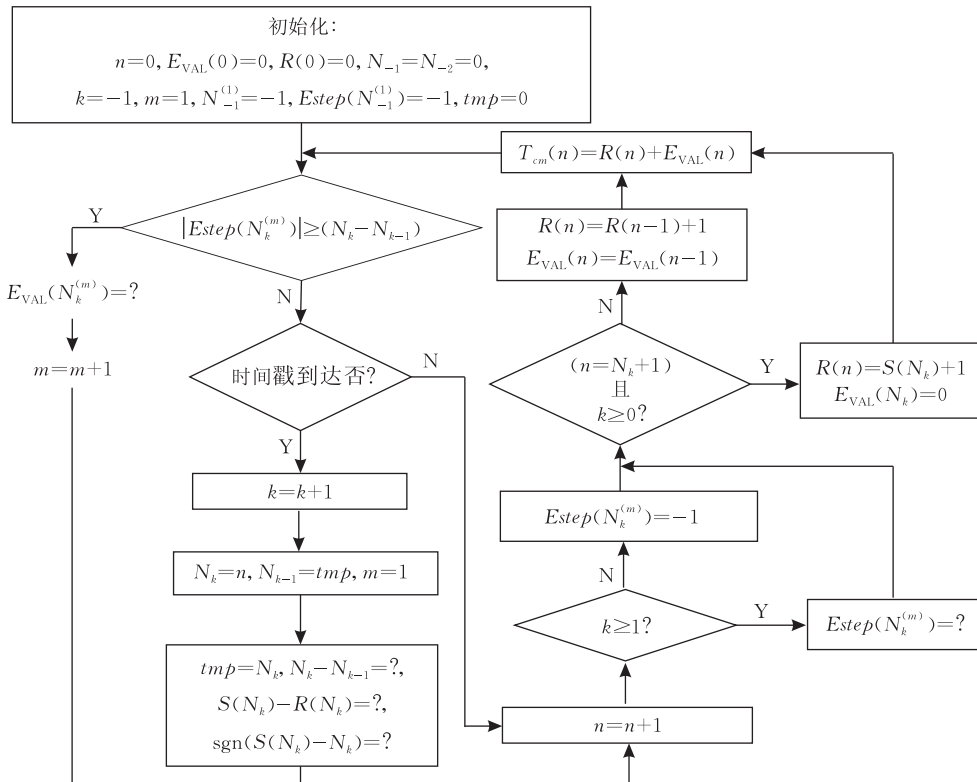


图 4 ACTSA 计算流程图

4.1 算法级仿真验证

本文首先在 MATLAB 中对算法建模仿真,仿真模型结构如图 5 所示,仿真参数见表 1.

算法仿真结果如图 6 所示.图 6(a)、(b)分别描绘了 $\Delta f > 0$, $\Delta f < 0$ 两种情况下 CM 的定时误差.

样本采样点为 CM 定时器工作脉冲上升沿.图中 $N_1 \sim N_5$ 为 TS 到达点,线 L_1 和线 L_2 分别表示未使用和使用 ACTSA 算法两种情况下的定时误差.图中 L_2 上出现 ± 1 “定时误差尖峰”原因为

表 1 算法模型仿真参数

频率偏差方向	参数						
	f_{cm}/MHz	$\Delta f/\text{MHz}$	f_{cmts}/MHz	$\Delta F_{cm}^{(k)}/\text{Hz}$	I_{sy}/ms	采样频率/MHz	每个 I_{sy} 内采样数
$\Delta f > 0$	10.20	± 0.04	10.24	$[-5, +5]$	≈ 1	$f_{cm} + F_{cm}^{(k)}$	10000
$\Delta f < 0$	10.28	± 0.04	10.24	$[-5, +5]$	≈ 1	$f_{cm} + F_{cm}^{(k)}$	10000

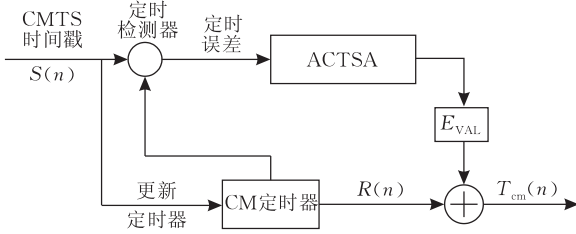


图 5 算法仿真模型系统结构

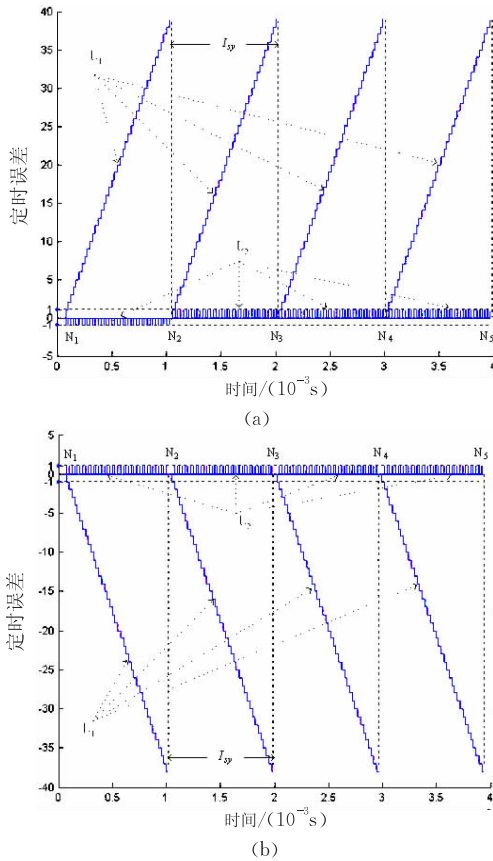


图 6 算法 MATLAB 仿真结果

(1) 算法采用误差延迟补偿策略,因而会短暂出现定时误差已为 1 但没立即补偿现象。

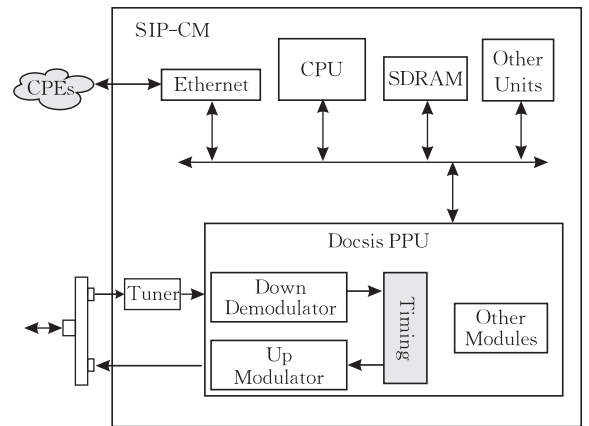
(2) CM 的定时器频率在相邻 TS 到达间隔 (N_{k-1}, N_k) 和 (N_k, N_{k+1}) 上具有 $\Delta F_{cm}^{(k)} < 5\text{Hz}$ 的频率偏移,算法根据 (N_{k-1}, N_k) 上已发生的定时误差估计 (N_k, N_{k+1}) 上将发生的定时误差,因此由式(35)、(36)计算得到定时误差补偿点与实际发生定时误差等于 1 的时刻存在微小偏差。

由图 6 所示的仿真结果可知,未使用 ACTSA 时,每个 I_{sy} 内 CM 定时误差随时间呈线性趋势增

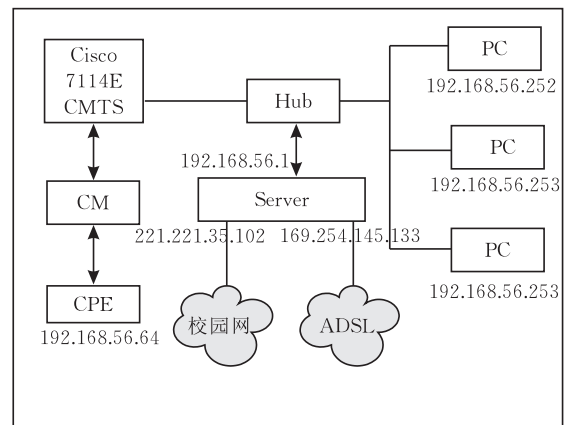
长,在离散点采样的表现结果呈现为图中所示的阶梯状上升,而采用 ACTSA 时,即使在较大 Δf 偏差(本例 $\Delta f = \pm 0.04\text{MHz}$)情况下,CM 的定时误差被限制在 $\{-1, 0, 1\}$ 内。上述 MATLAB 算法仿真结果与算法设计期望结果一致,初步验证了本文算法的正确性。

4.2 SoC 平台算法实现

本文的项目背景为交互式有线数字电视 CM SoC 芯片的研制和开发,为该项目开发的具有自主知识产权的 CM SoC 芯片(SIP-CM)简化系统结构如图 7(a)所示。其中 CPU 为我国自主研发的龙芯。Ethernet 模块支持 Ethernet/802.3 用户端协议栈,是 CM 与 CPE(用户专用设备)之间的通信接口。Tuner 将下行高频信号转换为中频信号,其输出连



(a) CM SoC 系统结构



(b) 定时算法验证环境

图 7

接到下行物理层解调模块 Down Demodulator. Docsis PPU(Protocol Process Unit)为 Docsis 协议处理器,包括下行同步、数据接收和发送等等,Up Modulator 完成上行信号调制及发射.其中 Timing 模块实现了本文所提出的 ACTSA.

在 SIP-CM 开发验证阶段,我们为其设计了基于 Xilinx XC2VP70 FPGA 的开发验证平台(SIP-CM-XL)以验证其功能.下面主要介绍基于 SIP-CM-XL 的 ACTSA 验证过程.

为验证 ACTSA 在 CMTS 与 CM 的实际交互环境中的正确性和定时精度,本文搭建了图 7(b)所示的测试环境.该环境中 CM 与 CMTS 距离约为 30m,通过 Cable 线连接,CMTS 为 Cisco 7114E.测试环境温度为 30℃左右.电源为 DH1718E-4 型双路跟踪稳压稳流电源.CPE 和 PC 均为 DELL Dimension 3100 微型机.此外 CM 和 CMTS 周围均无其它电气设备.

算法正确性验证 1.

借助与 CM 相连的 CPE 上的 ping 程序产生上行用户数据来检验 ACTSA 在控制接入上行 TDMA 信道的正确性.其中 CM 分别采用 Motorola 5100 和本文的 SIP-CM, SIP-CM 的 Timing 使用 10.24MHz 的晶体振荡器作为时钟源,两者的测试结果见表 2,结果表明 SIP-CM 在功能上与 Motorola 5100 完全等同,验证了本文算法的正确性.

表 3 SIP-CM 平台实际捕获样本

样本号	参数						
	f_{cm}/MHz	$TS(\text{HEX})$	$Cor_Tm(\text{HEX})$	$Err_Tm(\text{HEX})$	$Cor_TNE(\text{HEX})$	$Err_TNE(\text{HEX})$	$Time_Offset(\text{HEX})$
1	10.225	0x48fedb99	0x48fedb98	0x48fedb0a	0x01	0x8f	0x1761
2		0x492be36f	0x492be36e	0x492be2e0	0x01	0x8e	0x1761
3		0x92077d10	0x92077d0f	0x92077c81	0x01	0x8f	0x1761
4		0x924c884f	0x924c884f	0x924c87c0	0x00	0x8f	0x1761
5		0xaa5264f5	0xaa5264f3	0xaa526467	0x02	0x8e	0x1761
6		0xaa8b6e85	0xaa8b6e85	0xaa8b6df5	0x00	0x90	0x1762

表 2 SIP-CM 与 Motorola CM 的 Ping 程序测试统计数据

CM	Ping 命令	平均响应时间/ms	丢包率/%
Motorola 5100	Ping 192.168.56.252 -t	8	0
	Ping 192.168.56.253 -t	11	0
	Ping 192.168.56.254 -t	9	0
SIP-CM	Ping 192.168.56.252 -t	10	0
	Ping 192.168.56.253 -t	13	0
	Ping 192.168.56.254 -t	11	0

算法定时精度验证 2.

与验证 1 不同,本测试在 SIP-CM 中嵌入 Xilinx DCM IPcore,以 40.90MHz 的晶体振荡器作为该 DCM 输入时钟源,并使其产生 10.225MHz 的 4 分频时钟作为 Timing 模块的输入时钟.即 SIP-CM 定时器的参数为 $f_{cm}=10.225\text{MHz}$, $\Delta f=0.015\text{MHz}$.同时,为 Timing 模块编写 Monitor 硬件逻辑,将每个 TS 到达点的 TS 值、测距定时偏移量 $Time_Offset$ 及经算法调整和未调整的定时器计数值 Cor_Tm 和 Err_Tm 输出到 SDRAM,并由运行在龙芯上的软件程序通过串口输出到 CPE.

该实验测试结果见表 3 和图 8.其中,表 3 列出了 6 组随机采样的样本点,并计算出经算法调整和未调整的 CM 定时误差 Cor_TNE 和 Err_TNE .图 8 绘制了 1000 个随机样本点对应的 Cor_TNE 和 Err_TNE .该测试结果表明 $E(Cor_TNE)=1$,出现 $Cor_TNE=2$ 的原因解释为:算法未考虑 CMTS 本身时钟频率偏差、信道变化及 SIP-CM-XL 上的其它噪声影响.

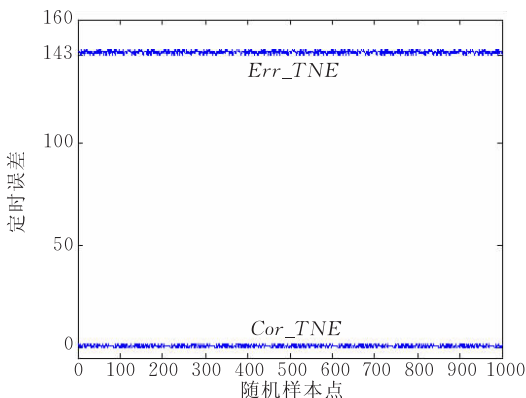


图 8 SIP-CM 平台定时误差性能比较

本节测试证明 ACTSA 在实际环境中具有同仿真同样的正确性和定时精度.定时精度为

$$\frac{1}{10.24 \times 10^6} \approx 97.656 \text{ ns},$$

该精度是 CMTS 允许的定时偏移误差 $1\mu\text{s}$ 的 10.24 倍^[2],由此可见,本文所提出的 ACTSA 对于提高 CM 定时精度有显著的效果.

5 结 论

本文为 HFC 网络 CM 与 CMTS 的全局定时同

步提出了一种自适应补偿定时同步算法,该算法采用线性延迟补偿策略准确定位 CM 定时误差补偿时刻,使 CM 能够在本地建立准确的定时基准,同步于 CMTS,为 CM 准确的上行传输提供了保证.通过理论推导、Matlab 算法级仿真以及实际网络环境下的测试,充分验证了本文算法的正确性和定时精度.实现有本文算法的 SIP-CM 已成功应用于 HDTV 双向点播系统、VOD、VoIP、Internet 网络通信等应用中并表现出优良的性能和可靠性.

参 考 文 献

- [1] Cable Television Laboratories. Data-Over-Cable Service Interface Specifications — Radio Frequency Interface Specification SP-RF1v1.1—C01-050907. CableLabs, 2005
- [2] Wang Qin, Long Ping, Zhang Xiao-Tong, Li Zhan-Cai. DOC-SIS ranging schemes analysis and embedded implementation. *Journal on Communications*, 2006, 27(9): 96-101 (in Chinese)
- (王沁, 龙萍, 张晓彤, 李占才. 基于 DOCSIS 规范的测距机制分析与嵌入式实现. *通信学报*, 2006, 27(9): 96-101)
- [3] Wang Qin, Dai Peng, Zhang Xiao-Tong, Li Zhan-Cai. A high performance algorithm for computing bandwidth requested mini-slots. *Chinese Journal of Computers*, 2006, 29(5): 705-710 (in Chinese)
- (王沁, 戴鹏, 张晓彤, 李占才. 一种高效的计算带宽请求微时隙的算法. *计算机学报*, 2006, 29(5): 705-710)
- [4] Aweya James, Montuno Delfin Y et al. Clock synchronization using a linear process model. *International Journal of Network Management*, 2006, 16(1): 3-28
- [5] Su Weilian, Akyildiz Ian F. The jitter time-stamp approach for clock recovery of real-time variable bit-rate traffic. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2001, 6(9): 746-754



WANG Qin, born in 1961, Ph. D., professor, Ph. D. supervisor. Her research interests include computer system architecture, SOC and IC design, computer network and communication, wireless network.

GUO Yan-Fei, born in 1980, Ph. D. candidate. His research interests include digital signal processing, IC design, embedded systems and communications networks.

SONG Li-Hua, born in 1979, Ph. D. candidate. Her research interests include embedded system design and network communications and protocols.

DU Li-Guo, born in 1982, M. S. candidate. His research interests focus on IC design.

Background

This paper is one of the research results of the subject “Core Technology Development of Cable-based Interactive Digital Television Channel Transmission”, which belongs to the project “Digital Television Transmission Technology research” supported by Momentous Science and Technology Plan of Beijing. Authors’ task is to design and implement a MAC protocol for the efficient transfer of data over HFC System according to the DOCSIS Specification. Now the research team has achieved a bidirectional system for HDTV, which meets the demands of the Cable-based Interactive Digital Television trials including interactive VOD, VoIP, Internet data service etc.

This paper firstly proposes an adaptive compensation timing synchronization algorithm, which bases on the analysis of timing synchronization mechanism for CMs. By accu-

rately predicting the time of which timing errors come up and giving timing compensation in time, the proposed algorithm can make CMs acquire the global timing synchronization to CMTS in(not sure) the HFC upstream TDMA channel, and ensure the CMs access the channel and transmit services correctly. Then, the paper describes an optimized implementation for the algorithm, which replaces all involved multiply-division operations by add-subtract operations. Thus, the optimized algorithm improves its universality and reduces its complexity. The proposed algorithm has been integrated in an independent design SoC chip for CM, the test results in real network conditions show that, by using the improved algorithm, timing precision of the CM is 10.24 times higher than the request of DOCSIS specifications, and has a good reliability.