

# 主从同步“松耦合”锁相技术

李忠文<sup>1</sup>, 李琦<sup>2</sup>, 孟志才<sup>1</sup>

(1. 成都泰富通信有限公司, 四川成都 610041; 2. 成都工业学院, 四川成都 610031)

**摘要:** 结合主从时间同步跨入纳秒级精度的趋势, 本文分析了主从同步中偏差和噪声类型, 描述了采用“松耦合”锁相技术对同步偏差进行修正并抑制传输噪声。“松耦合”锁相技术在实验室测试和实际工程应用中都得到了较好的效果, 实验室测试主从相对频率偏差优于  $\pm 5E-14$ /天(单槽恒温晶体钟); 工程应用中(铷原子钟)时间间隔偏差优于  $\pm 20\text{ns}/7$  天, 相对频率偏差优于  $\pm 3.3E-14/7$  天。

**关键词:** 时间同步; 时间间隔偏差; 松耦合锁相

**中图分类号:** TN9143; TN9137; TN874

**文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013) 11-2302-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.11.030

## “Loose Coupling” Phase Lock Technique for Master-Slave Synchronization

LI Zhong-wen<sup>1</sup>, LI Qi<sup>2</sup>, MENG Zhi-cai<sup>1</sup>

(1. Chengdu Tifu Communication Corporation, Ltd, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. Chengdu Technological University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract:** Combined with the trend of the master-slave synchronization in the nanosecond precision, this paper analyzes the deviation and noise type in the master-slave synchronization, describes how to use the “Loose Coupling” Phase Lock Technique to rectify deviation and restrain noise. “Loose Coupling” Phase Lock Technology has achieved better result in the laboratory test and practical project application, master-slave relative frequency deviation in the laboratory test is better than  $\pm 5E-14$  a day (single slot thermostatic crystal clock); the time interval deviation in project application is better than  $\pm 20\text{ns}$  7 days (rubidium atomic clock), the relative frequency deviation is better than  $\pm 3.3E-14$  7 days (rubidium atomic clock).

**Key words:** time synchronization; time interval deviation; loose coupling phase lock

## 1 引言

“时间”是七大物理度量之一。时间有两种内涵: 时刻和时间间隔, 度量时间准确度的物理量为“时间间隔偏差”TID (Time Interval Deviation)。时间的基本单位表示有年, 月, 日, 时, 分, 秒; 并可细分到纳秒, 皮秒和飞秒等, 目前 3G 和 4G 通信网络, 对时间服务器一级主站节点, 时间同步准确度要求已提高到纳秒级。

美国正将 GPS 系统的时间精度从优于 10ns 级改造升级到优于 1ns 级, 同时结合地面铯钟群的优势, 预计到 2020 年建成特高精度(优于 1ns)的“天地统一”时间频率同步网。

我国北斗卫星导航系统也将在 2020 年完成全球区域覆盖。目前时间精度优于 10ns 级。可见, 优于 1ns 级的时间精度是当今时频同步领域的一项先进技术, 也是现

阶段较难实现的应用型技术之一。

本文在我国需要优于 1ns 级的时间同步精度前提下, 提出应用主从同步“松耦合”锁相技术, 以光传输系统等为承载体, 将地面时间频率“融合”为一体——即实现主从同步的相对频差优于  $\pm 5E-14$ /天, 相对时间准确度优于 1ns。

## 2 时间同步原理

### 2.1 纳秒级的时间同步精度

关于时间同步, 目前缺少严格的权威定义, 可理解为: 通过一定手段使两只钟或多只钟(振荡器)产生的 PPS(秒脉冲)上升沿保持一致; 时间同步的原理就是按照主站的时间来调控从站的时钟(振荡器)和 PPS(秒脉冲)上升沿, 并使从站和主站保持一致。

1ns 级的时间精度即指主从时钟(振荡器)产生的

PPS(秒脉冲)上升沿的相对偏差优于 1ns.

### 2.2 时间与频率的内在联系

在主从时间同步模型中,相对时间间隔偏差可用公式(1)表示

$$E_s = E_0 + \frac{f_{主} - f_{从}}{f_{主}} * t + \frac{1}{2} * \alpha * t^2 + \frac{1}{2} * \Delta T_{xy}(t) + \psi(t) \quad (1)$$

公式(1),  $E_s$  为主从站相对时间间隔偏差;  $E_0$  为主从站初始时间间隔偏差  $\frac{f_{主} - f_{从}}{f_{主}} * t$ ; 是从站时钟跟踪主站时钟锁相后的残余频率误差,并与随时间增加引起误差累积;  $\alpha$  是从站时钟老化或日波动引入的剩余偏差;  $\Delta T_{xy}(t)$  是传输通道的不对称差值,不对称差值是一个随时间变化的函数,也会随时间产生漂移积累;  $\psi(t)$  是地面光传输系统引入的随机噪声.将使时间间隔偏差增加 4 微秒以上的随机抖动(突跳).

从式(1)可知,排除  $E_0$ (初始相位差)和  $\alpha$ (老化因素)影响,如主从时钟存在  $1E-12$ /天的频率误差,其时间的积累误差约 200ns/天,可见主从时钟频率同步精度对时间同步的精度影响是很大的,这即是时间和频率互动的体现.所以需要创造条件使主从站时间和频率同步进入良性互动,避免恶性互动.

## 3 “松耦合”锁相技术

### 3.1 “松耦合”原理

松耦合锁相又称延迟锁相技术,主要应用于控制高稳定度的振荡器,针对时间同步设备中的恒温晶体振荡器或者铷原子钟,实施高精度的闭环控制.

“松耦合”锁相环的主要参数为“环路时间常数”.为了滤除(极)低频的漂移,应使漂移有很低的截至频率  $f_c$ .  $f_c$  与环路时间常数  $\tau_{loop}$  的关系如式(2)

$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau_{loop}} \quad (2)$$

即  $\tau_{loop}$  越长,截止频率  $f_c$  越低.且随主从站时间同步状态的转换,  $\tau_{loop}$  是可变的,具体来说当从站“快捕”跟踪主站时需要较小的时间常数以便较快进入锁定跟踪状态;当从站锁定跟踪主站时环路时间常数需调整至较大值,以便更好的滤除主站传输后引入的抖动噪声.根据笔者经验  $\tau_{loop}$  变化范围可在 1~10000 秒之间.

### 3.2 “松耦合”锁相环的主要功能:

(1)主从站时间同步中,使从站相对主站时间偏差优于  $\pm 1ns$ ,频率偏差优于  $\pm 5E-14$ /天.

(2)主从站时间同步中,从站的噪声转移特性输出为从站振荡器的本底噪声,不会引入传输噪声或其他噪声.

(3)主从站时间同步中,当主站源切换时,从站输

出频率相位连续,不发生时间跳变.

(4)主从站时间同步中,当主站源不可用时,从站根据本地振荡器的等级具有相对应的守时保持能力.

## 4 “松耦合”锁相环实现

### 4.1 “松耦合”锁相环功能框图

如图 1 所示,“松耦合”锁相环主要功能框图.

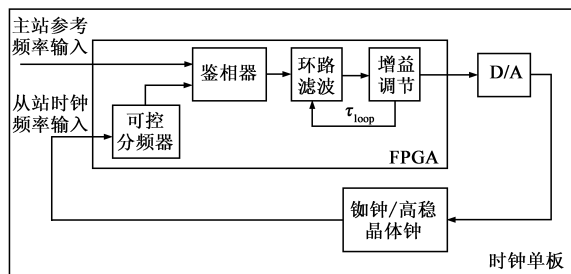


图1 “松耦合”锁相环功能框图

(1)可控分频器:对从站本地时钟(振荡器)信号分频,分频产生从 1Hz ~ 16KHz 的频率信号,并根据主站参考频率输入信号,动态选择本地的鉴相的频率信号.如主站参考为 1Hz 信号(常用于卫星参考输入)则选取分频器产生的 1Hz 频率信号.

(2)鉴相器:在 FPGA 内部,按照“双 D 触发器鉴相器(电路结构如图 2 所示)”原理构成数字鉴相器,完成从站时钟和主站参考频率的频率判决和相位关系判断,即当主站参考和从站时钟频率不相等时(频差大于  $1E-10$  量级),“双 D 触发器鉴相器”工作在“鉴频”模式;当主从站时钟相对频差较小时(频差大于  $1E-10$  量级),“双 D 触发器鉴相器”工作在“鉴相”模式,能分辨  $1E-11 \sim 1E-14$  范围频差.

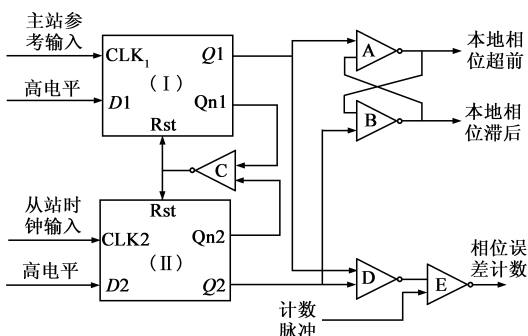


图2 双D触发器鉴相电路

(3)环路滤波和增益调节:这两个环节主要完成对鉴相数据的处理,判断本地时钟相对与主站时钟的钟差,产生 D/A 的控制量;并可通过环路时间常数  $\tau_{loop}$ ,调节环路滤波器增益,实现对主从站钟差漂移的滤除.

(4)D/A 和铷钟/高稳晶体钟:采用高分辨率的 D/A 器件对本地时钟进行细小步进( $2.56E-7$ 伏特)和大动

态范围(0~5 伏特)的调整。

### 4.2 “松耦合”锁相环主要技术细节

对应公式(1)中对主从同步中时间间隔偏差的描述,以下着重阐述,“松耦合”锁相,如何对各偏差因子进行“纠正”,从而实现高精度时间频率主从同步。

将“松耦合”锁相过程分为快捕锁定和稳态跟踪。其中快捕锁定对应“纠正”主从站初始时间间隔偏差  $E_0$ ,和缩减主从站相对频差  $f_{\Delta} = f_{\text{主}} - f_{\text{从}}$  至  $1E-10$  量级,此时公式(1)可近似为公式(3):

$$E_s \approx \frac{f_{\text{主}} - f_{\text{从}}}{f_{\text{主}}} * t + \frac{1}{2} * \alpha * t^2 + \frac{1}{2} * \Delta T_{xy}(t) + \psi(t) \quad (3)$$

随着 D/A 对本地时钟的调整,公式(3)中因子在快捕锁定阶段的“不利贡献”会被进一步削弱,如图 3 所示快捕锁定过程测试:此时从站时钟频率为  $f_{\text{从}} = 9.999999996893\text{MHz}$ ,相对主站时钟  $10.000000000000\text{MHz}$  的频差计算为:

$$\frac{f_{\text{主}} - f_{\text{从}}}{f_{\text{主}}} = \frac{10 - 9.999999996893}{10} \approx 3.107E - 11$$

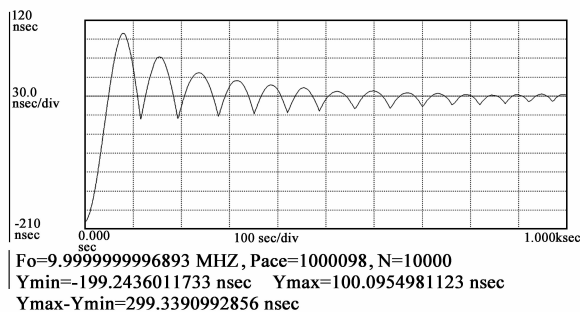


图3 “松耦合”快捕锁定过程

此时可进一步将公式(3)等效为式(4)

$$E_s \approx \frac{1}{2} * \alpha * t^2 + \frac{1}{2} * \Delta T_{xy}(t) + \psi(t) \quad (4)$$

并进入到稳态跟踪阶段。

在此阶段,考虑到主从时间同步过程经由专线传输,传输不对称差值  $\Delta T_{xy}(t)$  可认为是常量参数,根据传输线路参数可进行固定值补偿,因此稳定跟踪阶段主要考虑纠正从站时钟日波动和滤除传输线路噪声,经过对不对称差值的修正,可进一步提高主从时间同步的精准度可达  $3.19E-12$  如图 4 所示,此时主从站相对时间间隔偏差可表示为公式(5):

$$E_s \approx \frac{1}{2} * \alpha * t^2 + \psi(t) \quad (5)$$

根据振荡器厂家资料(图 5),笔者经过长期监测和计算得出表 1 振荡器跟踪精度和日老化因子参考表。

对应公式(5)中,日老化因子  $\alpha$  可选择表 1 从铷原子钟到单槽恒温晶体钟的老化因子进行线性修正(工

程实施中考虑低故障率因素,在每天 24 时~3 时进行老化参数修正),从而克服从站时钟的日老化的影响,恒温晶振时钟和铷钟,铯钟,氢原子钟的老化是有区别的,按 TDEV 要求检测 TIE 的每组观察测量周期晶体钟为 20~300s,铷钟 100~3600s,铯原子钟是 1000~10000s。

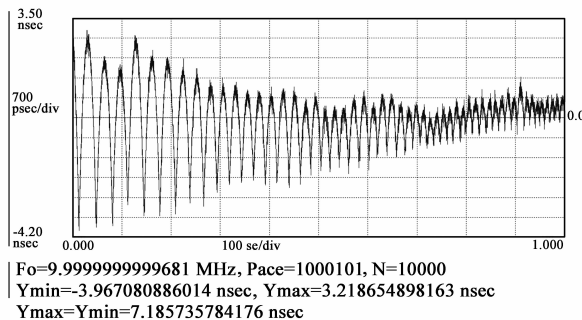


图4 “松耦合”锁相环稳定跟踪阶段

表 1 振荡器跟踪度和日老化因子参考表

时 钟 类 型 \ 锁 定 模 式	主从同步 从站相对一级主 站频率偏差	主从同步 从站相对一级主 站时间间隔偏差	主从同步从 站保持性能
工业铯原子钟	$< \pm 5E - 14/\text{天}$	$\pm 1\text{ns}/\text{天}$	$< 20\text{ns}/\text{天}$
铷原子钟	$< \pm 1E - 13/\text{天} \sim (5-9)E - 14/\text{天}$	$\pm 3.5\text{ns}/\text{天}$	$< 0.1\mu\text{s}/\text{天}$
低相噪双恒温槽 压控高晶体钟	$< \pm 1E - 13/\text{天} \sim 5E - 13/\text{天}$	$\pm (3.5 \sim 6)\text{ns}/\text{天}$	$< (5 \sim 10)\mu\text{s}/\text{天}$
双恒温槽 压控晶体钟	$< \pm 1E - 12/\text{天} \sim (5-9)E - 13/\text{天}$	$\pm 20\text{ns}/\text{天}$	$< (10 \sim 20)\mu\text{s}/\text{天}$
低相噪单恒温槽 压控晶体钟	$< \pm 1E - 12/\text{天} \sim 2E - 12/\text{天}$	$\pm 40\text{ns}/\text{天}$	$< 100\mu\text{s}/\text{天}$

至此主从时间同步时间间隔偏差最后可近似为式

$$E_s = \psi(t) \quad (6)$$

通过对主从同步时间间隔偏差前四项的修正,从站跟踪锁相精度达到:相对频率偏差优于  $\pm 5E-14/100\text{s}$ ,其相对相位偏差优于  $\pm 1\text{ns}/100\text{s}$ ,时间间隔偏差优于  $\pm 1\text{ns}/100\text{s}$ 。实测结果如图 6 稳态跟踪阶段 100s 时间间隔偏差所示

因此可利用稳定跟踪过程从站时钟较优秀的短期特性,滤除传输中带来的调制抖动噪声和漂动(统称噪声)。具体来说就是环路滤波取一定时间内相对时间间隔偏差均值来进行滤波处理,即

$$\frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} TIE_i = \overline{TIE} \quad (7)$$

如(7)式中,每 100 次进行一次加权滤波,并以此均值参与作为环路控制的参数.再加上对传输过程的系

统倒换,瞬时相位阶跃等等进行深入处理,从站时钟输

出基本上还是它的本底噪声,即优于 1ns.

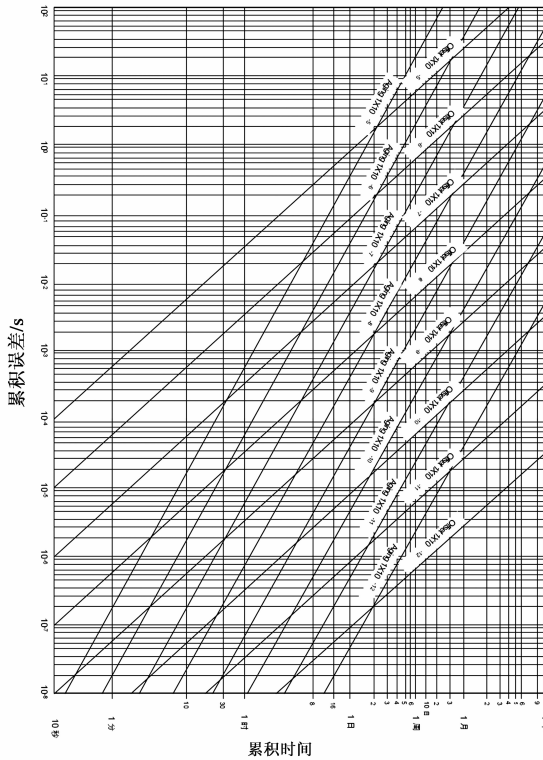


图5 某厂家振荡器老化测试参数图

误差累积, 准确度与老化率的关系曲线

Offset-初始准确度  
Aging-老化率

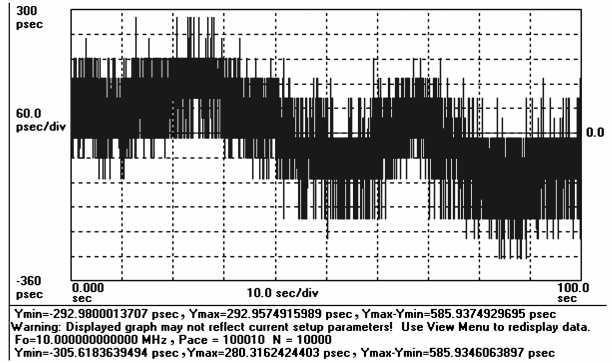


图6 稳态跟踪阶段100s时间间隔偏差

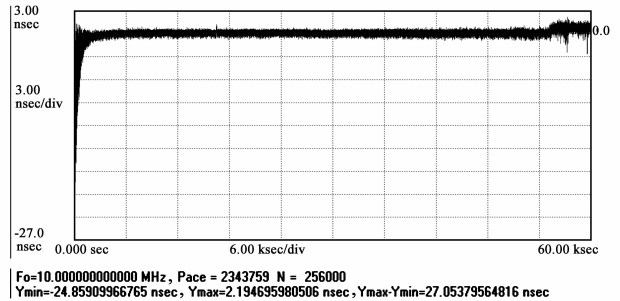


图7 二十四小时主从同步精度

公式(1)的 5 项的综合效果体现为:

相对频率偏差优于  $\pm 5E-14$ /天.

相对相位偏差优于  $\pm 1$ ns/天.

相对时间间隔偏差优于 1ns.

### 5 结论和展望

(1)在实验室中,我们采用铯原子钟或跟踪 GPS 的铷原子钟做为时间同步设备主站,加强型二级晶体钟为从钟,通过 50km 光纤及 SDH 光传输设备,利用主从同步“松耦合”锁相技术进行模拟测量.相对频率偏差实测结果达优于  $\pm 5E-14$ /天,如图 7 二十四小时主从同步测试示.

(2)在某地的频率同步设备上(运行三个月以上)进行了为期两周的在网测试,主从同步实测结果均为时间间隔偏差优于  $\pm 20$ ns/7 天,相对频率偏差  $\pm 3.3E-14$ /7 天.每天的为  $\pm 20$ ns/天,  $\pm 2.3E-13$ /天.

(3)通过实验和验证,我们很清楚地认识到要实现优于 1ns 的特高精度时间同步精度,必须在系统中实现优于 1ns 的低相位噪声环境以及低相位噪声的输入输出系统.另外公式(1)中的不对称差值也需要优于 1ns 的补偿,最终使主从时间同步设备能够将传输过程中的随机噪声和抖动滤除,并实现主从同步系统的纳秒级高精度.

(4)如果以国家授时中心 600 万年差 1s 的高精度原子钟为主时钟来同步全国各类通信中心的铯原子钟组,组建“0 级”时间频率同步网;由“0 级”的从时钟节点为主时钟,各省市的(或铷)原子钟为从时钟组建“一级”时间频率同步网;再由“一级”时钟节点为该行政区域的主时钟,各地市自治州为从时钟组建“二级”同步骨干网;由地市自治州中心的时钟为主时钟,各县区为从时钟组建“三级”时间频率同步网.逐级采用松耦合锁相就能使同步网的时间频率基准精确度提高 20 倍.

### 参考文献

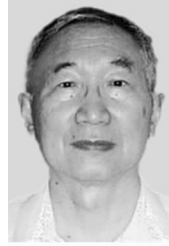
- [1] 万心平,等.通信工程中的锁相环路[M].西安:西安电子科技大学,1980.
- [2] 部熙章.数字网同步技术[M].北京:人民邮电出版社,1995.
- [3] 童宝润.时间统一系统[M].北京:国防工业出版社,2003.
- [4] 胡永辉,等.时间测量原理[M].香港:香港亚太科学出版社,2000.
- [5] 于佳亮,等.通信同步网与网同步[M].北京:人民邮电出版社,2011.
- [6] 颜森林,光纤混沌双向保密通信系统研究[J].电子学报,2005,33(2):266-270.

YAN Sen-lin, Studies on Optical fiber bi-directional chaos secure communication systems[J]. Acta Electronica Sinica, 2005,

33(2):266 – 270. (in Chinese)

- [7] 王洪波,等.一种消除单向时延测量中时钟钟差和时钟重置的新方法[J].电子学报,2005,33(4):584 – 589.  
WANG Hong-bo, et al. A new approach for removing clock skew and resets from one-way delay measurement [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(4): 584 – 589. (in Chinese)
- [8] Sander L J. Gierkink. Control Linearity and Jitter of Relaxation scillators[M]. Enschede. Universiteit Twente. 1999.
- [9] Penrod B M. Adaptive Temperature Compensation of GPS Disciplined Quartz and Rubidium Oscillators[A]. Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium [C]. Honolulu, HI, USA. 1996. 980 – 987.
- [10] Nicholls C W T, Carleton G C, Adaptive OCXO Drift Correction Algorithm[A]. Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition [C]. Montreal, Canada. 2004. 509 – 517.
- [11] Stein S R. Kalman Filter Analysis of Precision Clocks with Real-time Parameter Estimation[A]. Proceedings of the 43th Annual Symposium on Frequency Control [C]. Denver CO: USA. 1989. 232 – 236.

## 作者简介



李忠文 男,1940年出生,邮电部第五研究所高级工程师.长期从事有线传输通信设备研发工作,先后参与和从事:同轴电缆大通路载波系统设备研发;GPS/GLONASS 双星接收数字同步时钟设备;CDMA 无线通信系列时间频率同步设备;参与我国频率同步网络多项国标和军标的制定工作.80,90年代先后获得多项国家科技进步奖及部委的嘉奖.拥有有线传输系统及高精度锁相的多项专利.先后发表了“17400KHz 锁相电路”;“4X4 扩容 900 路遥测锁相环路”;“2048KHz 锁相电路设计”;“光通信传输网络延迟不对称差值精确测量技术及其应用”等文章.

E-mail: jetaimeamote@yeah.net



李琦 女,1972年出生,成都工业学院副教授.长期从事教学一线工作,国家级教学团队,省级教学团队“计算机信息管理专业教学团队”成员.主编教材大学计算机基础,计算机应用基础,Visual Basic. NET 程序设计,大学计算机基础实训教程等.