

基于时间间隔测量的宽范围高分辨率 时间同步检测方法

杜保强¹, 刘 丹¹, 郭淑婷¹, 王延峰¹, 曹玲芝¹, 左艳迪¹, 周 渭^{1,2}

(1. 郑州轻工业学院电气信息工程学院, 河南郑州 450002; 2. 西安电子科技大学信息处理研究所, 陕西西安 710071)

摘 要: 针对传统时间同步技术中测量范围与分辨率之间的矛盾, 提出一种基于时间间隔测量的宽范围高分辨率时间同步检测方法. 利用电磁波信号在特定介质中传播的准确性和稳定性, 结合任意信号之间无需频率归一化处理的异频相位检测原理, 以时空转换关系为基础, 将基于长度游标的时频测量技术应用于导航卫星 1pps 信号的同步检测, 进而提高 1pps 信号之间时间差测量的分辨率. 同时, 该技术与传统的高精度时间间隔测量方法配合使用, 形成多层次逐级测量法, 可以进一步扩宽测量范围. 实验结果证明了该方法的合理性和科学性, 其测量分辨率可达到 50ps 量级, 稳定度优于 10ps. 该方法将为我国航空航天、导航定位、通信、计量、雷达、天文等高科技领域的进一步发展提供理论指导并对其中关键的时间同步方面提供技术支持.

关键词: 时间同步; 异频相检; 卫星导航; 多层次测量

中图分类号: TM935.15

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2013) 06-1076-08

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

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.06.006

High-Resolution and Wide-Range Time Synchronization Detection Method Based on Time Interval Measurement

DU Bao-qiang¹, LIU Dan¹, GUO Shu-ting¹, WANG Yan-feng¹, CAO Ling-zhi¹, ZUO Yan-di¹, ZHOU Wei^{1,2}

(1. College of Electric and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, Henan 450002, China;

2. Institute of Signals and Data Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: Aiming at the contradictory between measurement range and resolution in the traditional time synchronization technology, a high-resolution time synchronization detection method with wide range is proposed on the basis of time interval measurement. Using the accuracy and stability of electromagnetic wave signal transmission in a specific medium, combining the different frequency phase detection principle without frequency normalization between any signals, and based on the conversion of time and space relations, a time-frequency measurement technique based on length vernier is used in navigation satellite for the synchronization detection of 1pps signal, which improves the resolution of the time difference measurement of 1pps signal. Moreover, the multi-levels measurement method formed by combining the technique and the traditional time interval measurement method with high precision has a wide measurement range in time and frequency measurement field. It was found that the method is reasonable and scientific in our experiment. Experimental results show that the measurement resolution with 50ps can be obtained in this method, and its stability is better than 10ps. The novel method may be useful for providing the theoretical guidance and the key technical support of time synchronization to the Chinese high-tech areas, such as aeronautics and astronautics, navigation and positioning, communication, metrologica, radar, astronomy and so on.

Key words: time synchronization; different frequency phase detection; satellite navigation; multi-levels measurement

1 引言

所谓时间同步是指两频率信号之间的时间差被消除或被最小化处理, 并且处理后的时间差不会随着时间的延伸而发生改变的过程. 时间同步最大的特征是两信号之间的时间差或相位差具有恒定不变性. 高精度的时

间同步技术不仅在地球动力学、脉冲星周期、相对论及人造卫星动力学测地等基础研究方面有着重要的作用, 而且在航空航天、导航定位、深空通讯、地质测绘、电力传输、科学计量、卫星发射、国防及国民经济建设等领域也具有极其重要的地位^[1,2]. 在军事上, 时间同步的应用十分广泛, 精度要求也特别高. 从飞机、导弹等目标的

收稿日期: 2012-08-24; 修回日期: 2013-01-12

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60772135, No. 10978017); 中国博士后科学基金 (No. 2011M501446, No. 2012T50738); 河南省基础与前沿技术研究基金 (No. 122300410169); 郑州市重点攻关项目 (No. 121PZDGC245); 中国科学院精密导航定位与定时技术重点实验室开放基金 (No. 2012PNTT01); 郑州轻工业学院博士基金 (No. 2011BSJJ031); 郑州轻工业学院科研基金 (No. 2012XJJ009)

精密定位、突发的保密通信、预警及火控雷达网的协调工作到各兵种的协调作战都离不开高精度的时间同步.例如美国军方的 GPS 全球卫星定位系统、俄罗斯军方的 GLONASS 全球卫星定位系统,这两个系统的卫星上都放置了高准确度的巡航导弹,这些巡航导弹只有在一定的准确度下才能击中目标并造成一定的杀伤力,其时刻准确度要求在 $\pm 50\text{ns}$ 之内,频率准确度要求在 $\pm 5 \times 10^{-13}$ 之内,而且它们的取值越小命中率越高.在航天领域,如火箭发射以及升空后的实时定位等都需要高精度的时间和频率同步.高精度时间同步还是双基地雷达能正常工作的基本条件^[3,4],当同步精度为 100ns 时,定位误差为 30m ,当同步精度为 1ns 时,定位误差为 0.3m .在现代通信系统中,数字同步网、电信管理网以及信令网并列为电信网的三大支撑网,它是通信网正常运行的基础,也是保障各种业务正常运行和提高质量的重要手段^[5,6].数字同步网主要需要频率同步,如果频率不同步,那么收发双方的采样时间就不会一样,从而造成数据传输错误.基于数字同步网的业务网,如 SDH 通信网的时间同步,CDMA 基站间的时间同步等,不仅需要频率同步,而且需要高精度的时间同步^[7,8].高速数字通信系统现在一般要求时钟同步的时刻准确度小于 $\pm 0.5\mu\text{s}$,频率稳定度优于 $\pm 5 \times 10^{-12}$.

通过以上各领域在时间同步方面的应用性分析可知,高精度的时间同步技术离不开精密时间尤其是短时间间隔的测量.随着军事民用、国防军工等领域的迅猛发展,对时间间隔尤其是短时间间隔的测量分辨率提出了更高要求^[9,10].目前,传统的高精度短时间间隔测量方法主要有时间扩展计数法、时间-幅度转换法及时间游标法等^[11].时间扩展计数法采用模拟内插技术使所测时间间隔相对大小缩小 1000 倍,使计数器的分辨力提高了三个量级,但存在 ± 1 个计数误差,转换时间长,非线性度大,不常使用;时间-幅度转换法利用现代高速 ADC,结合离散器件可达到 $1 \sim 20\text{ps}$ 的分辨率,若采用 ASIC 替代离散器件且与 ECL 电路配合使用,可使精度达到 10ps ,但这种方法模拟部分难以集成,非线性难以消除.时间游标法是一种以时间测量为基础的计数方法,类似于机械游标卡尺的原理,其测量关键在于能较为准确的测出整周期数外的零头或尾数,以提高时间的分辨力和准确度,避免了 ± 1 个计数误差,但这种方法需要高稳定度的可启动振荡器和高精度的重合检测电路,制作调试技术难度大、造价高,且受抖动的影响,转换时间长,制作工艺复杂;处于对高精度、高分辨率、结构及成本方面的考虑,在时间游标法的基础上,发展了基于时空关系的时间间隔测量方法,但这种方法受到长度刻度精细程度的限制,在技术实施上会有一些困难,所以在时空转换的基础上与长度游标

法相结合继而产生了基于长度游标的时间间隔测量方法.这种方法利用了时间信号在空间或特定介质中传播的准确性和稳定性,根据延迟的长度确定被测时间间隔,简单、易行且具有优于 10ps 量级的测量分辨率,但由于受负载和衰减的影响,测量范围有限,大大限制了其应用的广泛性.大量实验证明,在时间同步检测方法中,对于非周期信号或者采用非周期时间测量技术的测量分辨率高于 10ps 是非常困难的.传统的时间间隔测量方法,测量范围宽,但是测量精度不高;而基于时-空转换的长度游标法测量精度高,但测量范围有限^[12].针对上述时间间隔测量方法中存在的缺陷,结合传统时间间隔测量方法与基于时-空转换的长度游标法的优点,设计出一种多层次的时间间隔测量方案.将该方案应用于导航卫星 1pps 信号的同步检测,进而提出一种基于时间间隔的宽范围高分辨率时间同步检测方法,以实现 1pps 信号之间的高精度时间同步.基于多层次的时间间隔测量方案,很好的解决了测量范围和分辨率的问题,同时也充分利用时间信号传递的稳定性达到高分辨率的时间同步及控制.

2 宽范围高分辨时间间隔测量方案

2.1 时-空转换原理

时空转换的基础是电磁波信号传播的高速性、高度准确性和稳定性,如图 1 所示.

图 1(a)是 10MHz 正弦波信号在长度为 2cm 延迟线(同轴电缆线)上所对应的时间间隔,图 1(b)是 1MHz 窄脉冲信号在长度为 20cm 的延迟线上所对应的时间间隔.通过电磁波信号在同轴电缆线的传输速度实验^[13]可知:(1)时间量和空间长度量的关系是高度线性稳定的;(2)时间信号在同轴电缆线中的传输速度约为 $2 \times 10^8\text{m/s}$,但根据实验中所用导线形式的不同,传输速度会稍有变化(例如采用 SYV75-5-3 同轴电缆,时间信号的传输速度为 $19.94 \times 10^8\text{m/s}$).在这种情况下, 1ns 的传输延迟约为 20cm , 1ps 的传输延迟约为 0.2mm .这样可以通过时间信号在长度上的延迟以相应的长度量来反映其对应的时间量.在精密时间间隔测量中,与时间量相对应的长度量的测量往往比较容易处理,所以可以通过对空间长度量的精确控制达到对相应时间量测量的目的.当然,利用电子器件(如各种门电路等)的传输延迟也能设计出时间间隔测量仪器,但这些器件的传输延迟时间比较长,器件的稳定性也会影响测量精度,因此利用无源传输通道的特性来实现时间的测量比有源器件更有利.

2.2 基于时-空转换的长度游标法

利用基于时-空转换的时间间隔测量方法对时间量进行测量,简单、易行且具有很高的稳定性.但这种

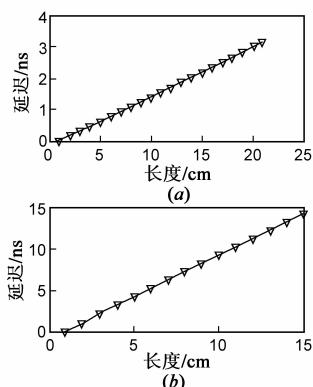


图1 时空转换关系原理

方法的测量分辨率常受到长度刻度精细程度的限制. 长度越短,刻度的准确度越难掌握,在技术实施上越困难.另外,在信号采集过程中,从传输通道提取信号的密集度越大,对信号传输速度产生的影响越大^[14].为此,将时空转换与长度游标法相结合形成基于时-空转换的长度游标法,可以降低实施过程中的技术难度,并且在长度刻度不是很密集的情况下也能获得较高的测量精度.具体测量方案如图2所示.

图2按工作原理可分为信号调理模块、延迟模块、异频相位检测模块、信号处理模块四部分.

(1) 信号调理模块

为了防止电磁波信号在同轴电缆线中传输时所造成的衰减、失真等因素,以导致信号传输位置判断上的误差,同时也为了方便测量和特征信号的检测,被比对的正弦波信号(开门信号和关门信号)均需被调理为宽度合适的窄脉冲信号或前后沿均很陡的方波信号.这里脉冲宽度的调整采用分压延时的方法^[15,16],如图3所示.

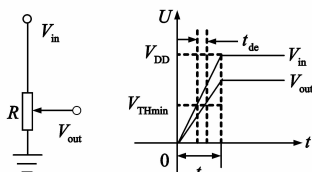


图3 分压延时原理

图3中 t_{dc} 是利用分压延时法引入的延时量,通过改变电位器上下部分的电阻比例,即可方便地调节延时量 t_{dc} , $0 < t_{dc} < t_r/2$, t_r 是输入波形的上升时间,约为2ns,所以 t_{dc} 最大可到1ns.用这种方法来获得延时,其调整分辨率可达到1ps,而且获得的延时量很稳定.

(2) 延迟模块

开门信号和关门信号被调理为宽度合适的窄脉冲信号后,分别被送入两个串行延迟通道即双路串行延迟线.开门一路延迟线(即延迟线I)在长度上略大于关门一路延迟线,它们之间长度差的大小取决于测量所

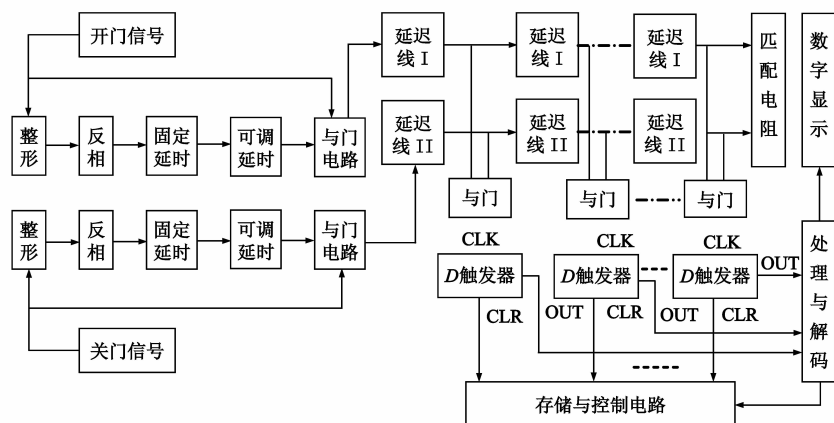


图2 基于长度游标的时间间隔测量方案

要达到的分辨率.根据时-空对应关系,两路延迟线之间的长度差就体现了开门信号和关门信号在传输延迟上的时间差,这样被延迟的开门信号将与关门信号发生重合.实际上,被测短时间间隔的大小就等于两路延迟信号发生重合时所经过的延迟单元的个数.被测短时间间隔被量化,从而实现了从模拟时间到数字的转化且具有很小的量化误差^[17,18].至此,对时间量的测量就转换成了对空间长度量的测量,测量分辨率取决于作为两路延迟线的长度差.当两路延迟线的长度差设置在毫米级或亚毫米级时,达到10ps至ps量级的测量分辨率是非常容易的^[19,20].这种无源延迟通道特性不但具有高的分辨率,而且还具有好的稳定性.线路的稳定性常常起到决定时间间隔测量的模糊状况的作用.这里以1m的同轴电缆线作为延迟通道,采用图4所示装置连续测量该延迟线所造成的被测时间间隔.一则可以观察给出重合显示的边沿的稳定性,二则也可以检查显示值的长期漂移.

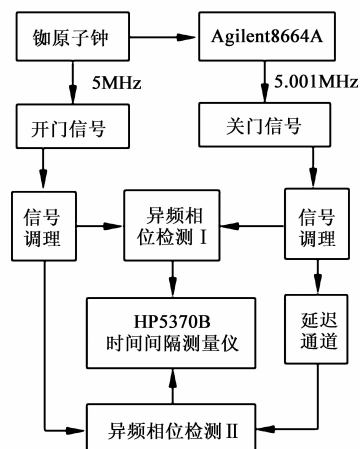


图4 时间信号传输稳定性实验装置

图4中,铷原子钟产生两路信号,一路5Mz信号作为开门信号,另一路经Agilent8664A频率合成器产生5.001Mz信号作为关门信号.相位重合检测电路I产生

的相位重合点作为 HP5370B 时间间隔测量的开始,关门信号经 1m 导线延迟后与开门信号的相位重合点作为 HP5370B 时间间隔测量的结束,数次测量结果如表 1 所示.

表 1 时间间隔测量结果

测量次数 n	1	2	3	4	5
时间间隔 t/ns	5.019	5.030	5.053	5.017	5.028
测量次数 n	6	7	8	9	10
时间间隔 t/ns	5.046	5.026	5.049	5.041	5.031

根据表 1 所测数据,计算出被测时间间隔的实际平均值 T_{pagv} ,

$$T_{\text{pagv}} = \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} t_n \approx 5.034 \text{ ns} \quad (1)$$

根据时间信号在 SYV75-5-3 同轴电缆线中的传输速度,被测时间间隔的理论平均值 T_{tagv} 为,

$$T_{\text{tagv}} = \frac{1}{0.1994} \approx 5.015 \text{ ns} \quad (2)$$

比较式(1)和式(2),其平均时间间隔误差 e_{p-t} 为,

$$e_{p-t} = T_{\text{pagv}} - T_{\text{tagv}} = 5.034 - 5.015 = 19 \text{ ps} \quad (3)$$

由此可见,被测时间间隔的理论平均值与实际平均值基本一致.由于相位重合检测电路、频率合成器的噪声、量化误差及系统误差等因素的影响,所产生的约 19ps 的误差是可以接收的.

(3) 异频相位检测模块

在每个延迟模块后设置相应的检测电路,对延迟后的两路信号进行相位重合点检测,同时记录每一路信号所经过的延迟模块的个数.该方案主要采用了异频相位检测^[21,22]的方法,原理是将两个不同频率的信号送入检测电路进行相位比对,以最小公倍数周期^[23]为间隔捕捉相位重合点,该相位重合点经 CPU 处理后,被送往存储与控制电路,用来作为时间间隔测量结束的控制信号.该方法要求被比较的两个信号有较高的频率稳定度,且测量分辨率取决于它们之间的等效鉴相频率,理论上在 GHz 到 THz 的等效鉴相频率下能够获得皮秒甚至飞秒量级的测量分辨率.与之相适应的两路延迟线的长度微差至少被设置在毫米甚至纳米级.另外,时间间隔测量的精度主要取决于相位重合点检测的精度,这里异频相位重合检测电路主要采用了工作在 ECL 电平下的双 D 触发器 MC10H131,该触发器为边沿检测型主从触发器,如图 5 所示.

图 5 中的相位重合信息来自于“与门”电路,当开门和关门信号没有发生相位重合时,输出为“0(低电平)”,发生相位重合时输出为“1(高电平)”.D 触发器的时钟控制端接“与门”电路的输出,当重合为信息为“0”时,存储器将记录延时模块的个数,当重合为信息为

“1”时,证明两信号已发生了严格的相位重合,控制器将产生关门控制信号,同时送入 D 触发器的“CLR(异步清零)”端,时间间隔测量结束.在实际的检测中,由于建立时间和保持时间的影响,当被延迟的开门信号上升沿与关门信号重合时,便可能会破坏建立时间和保持时间,电路会出现不稳定的工作状态.经过测量,这个不稳定的区域只有十几 ps,相对于系统测量的分辨率,其影响可以忽略,同样,D 触发器之间的离散性对检测也有影响,这个影响也在 10ps 以下,均可以被忽略.

(4) 信号处理模块

相位重合信息经过异频相位检测电路后,获得的相位重合检测信息被送往 CPU 进行解码,通过解码器就可以得到被测时间间隔.该模块主要完成时间间隔的测量、测量闸门的判断、开门脉冲和关门脉冲信号及相位重合点信息的处理.具体测量原理如图 6 所示.

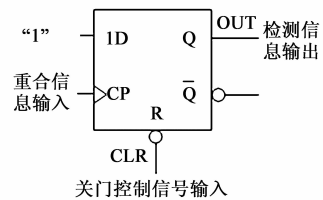


图 5 相位重合检测电路

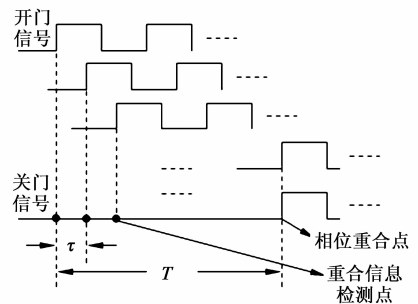


图 6 量化时间间隔测量原理

图 6 中 T_x 为开门信号与关门信号之间的时间间隔即要求测量的短时间间隔, τ 是单个延迟模块的固定延时值,其大小由信号传输的速度、被测时间间隔的范围及测量要达到的分辨率来确定.在基于长度游标的时间间隔测量方案中, τ 为延迟线 I 与延迟线 II 的长度差所对应的延时值.若开门信号经过 N 个延迟模块后与关门信号发生重合,则可计算出被测时间间隔 $T = N\tau$.在实际的时间间隔测量中,为了防止被测信号在延迟线中反射传播,在每组延迟模块后面均加有匹配电阻.考虑到延迟导线的阻抗对被测信号的衰减,在匹配电阻的后面附加一个缓冲器,以增强被测信号的驱动能力从而使其完成在延迟导线中的传播.

2.3 多层次时间间隔测量方法

所谓多层次时间间隔测量方法就是将多种不同原理的时间间隔测量方法(如模拟内插法、长度游标法等)结合起来,不同层次的测量方法具有不同的测量范

围、测量准确度及分辨率,利用它们的优点,相互弥补其缺点,最终形成一种新的多层次时间间隔测量方法,其基本原理是:采用具有不同分辨率的测量方法对被测时间间隔进行多层次的高精度测量.每层次的测量都具有不同的测量范围和测量精度,下一层测量总比上一层测量的测量分辨率和测量精度高.每一层测量都在 CPU 的控制下进行,上一层测量结果输入 CPU, CPU 根据该测量结果控制自适应移相模块确定移相值的大小,在 CPU 控制下,移相值直接输出到下一层测量,移相值输出的同时,下一层测量开启,同时上一级测量关闭.比如:若被测量时间间隔为 6.513ns,若第一层测量的分辨率为 5ns,则有 1.513ns 不能被分辨,第一层测量结果应为 5ns,此时可移相 5ns,则原被测时间间隔就变成了 1.513ns,而第二层的分辨率比第一层高,比如分辨率为 20ps,则对第二层来说,被测时间间隔不是 6.513ns 而是 1.513ns,第二层测量有 13ps 不能被分辨,第二层测量结果应为 1.5ns,此时可移相 1.5ns,继续第三层,以此类推,直到达到同步要求为止,测量方案如图 7 所示.

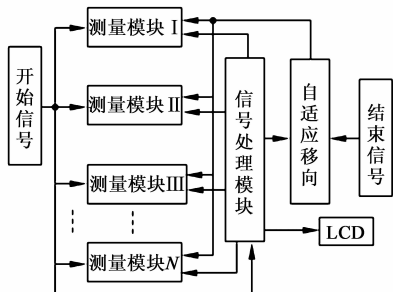


图7 高分辨率多层次时间间隔测量

结合图 7 所示测量方案,测量模块 I 较测量模块 II 是粗测,测量范围较宽,分辨率相对较低,把测量 I 的结果送入 CPU, CPU 根据测量 I 模块的结果去控制“自适应移相模块”以确定移相值的大小,同时关闭测量模块 I 并开启测量模块 II. 两个信号之间的时间间隔等于测量模块 I 的结果加上低于测量模块 I 的一个分辨率. 同样测量 II 模块较下一级测量模块 III, 测量范围较宽,分辨率相对较低,把测量模块 II 的结果送入 CPU, CPU 根据测量模块 II 的结果去控制“自适应移相模块”以确定移相值大小,同时关闭测量模块 II 并开启测量 III 模块,此时两个信号之间的时间间隔最大是一个测量 I 的分辨率,并且等于测量 II 的结果加上测量 II 的分辨率. 如果还有超过第三层次的测量,往后依次类推……,直到测量的分辨率满足测量要求为止. 也就是各测量环节的测量范围逐级缩小,精度逐级提高. 最终使两个比对信号之间的时间间隔接近于同步. 文献[24]曾经用类似的方法对提高时间间隔测量的分辨率进行了研究,但由于其采用的测量模块级数太少(仅有三级)、延时

量补偿没有自适应性以及各级所采用方法之间缺乏关联性和最优性,最终仅得出了每级传统意义上的测量分辨率,并未给出多层次测量作为一个整体测量方法所能达到的分辨率,因而难以预测其在工程上的实用性.

在同步调整方面,有载波周期调整、载波移相调整、时间信号的延迟调整等. 这方面最终确定测量精度的只是高分辨率、短时间间隔的测量方法,如长度游标法等. 其他方法只是起到了确定测量范围并控制和缩小这个范围的作用. 因此,总体上,该方法体现出了低成本和特高的分辨率.

3 实验及分析

在时间同步测量、控制环节中多层次的时间间隔测量方法充分利用了各种有缺陷方法的优点而避免了它们的缺点,实现了时间信号的同步. 首先对较长被测时间间隔采用宽范围的测量方法作为粗测,比如模拟内插法,其测量分辨率在 1ns 到几 ns;其次通过控制、调整,使得两个比对的 1pps 信号之间的时间间隔小到一定程度(接近于同步),再利用窄范围、高精度的方法作为精测,比如长度游标法,其测量分辨率可以达到 1ps;然后将检测结果反馈给控制电路,进行必要的时间同步操作,使得各路输出的时间信号间的间隔进一步减小趋向准确的同步. 时间间隔的精密测量不但要保证测量的精度而且也必须从可靠性、设备的复杂程度等方面考虑,同时也要考虑到测量环节和对于各时间信号之间的间隔具有控制“闭环”的特征. 因此,在导航卫星 1pps 的同步和检测中考虑采用多层次的时间测量方法,也就是各测量环节的测量范围逐级缩小,精度逐级提高,即采用模拟内插法作为粗测,而对于通过测量、

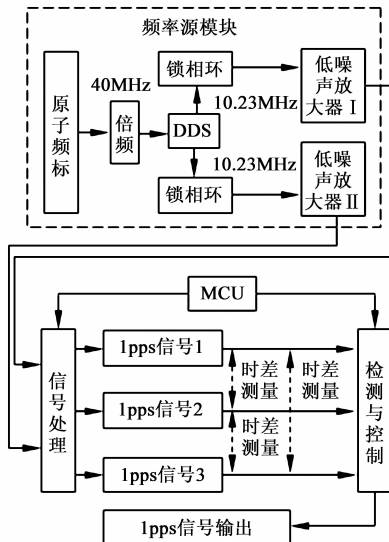


图8 1pps信号时间同步检测实验方案

控制及调整使得两个 1pps 信号间的时间间隔接近于同步时采用长度游标法作为细测,进而实现短时间间隔的精确测量,实验方案如图 8 所示.

图 8 所示方案主要包括频率源模块、信号处理模块、时间同步模块和同步检测模块四部分.

3.1 时间同步模块

频率源产生的频率信号经过处理产生 3 路 1pps 信号,使用图 2 所示的基于时-空转换的长度游标法对 3 路信号进行同步检测,最终产生稳定的 1pps 时钟信号,如图 9 所示.

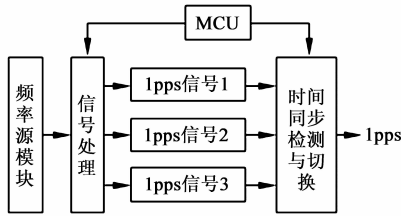


图9 1pps信号时间同步检测原理

3.2 相位异常检测模块

此模块采用冗余设计,3 路时间产生单元,将每一路时间产生单元所产生的 1pps 信号送至相位异常检测与切换模块,使用多层次的时间间隔测量方法对其进行检测,当其中一路 1pps 产生电路发生故障时,通过相互之间的时差可以判定出故障源,并对相位模块进行复位.也就是说,当其中一路 1pps 发生跳相时可以保证时频分系统输出 1pps 相位稳定,而两路 1pps 同时发生跳相的几率小于一路 1pps,可以提高 1pps 产生模块的健壮性,如图 10 所示.

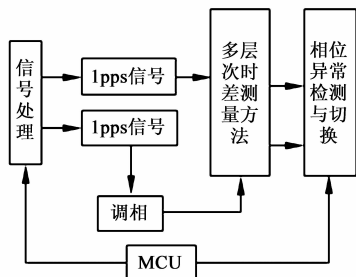


图10 1pps信号相位异常检测原理

图 10 中的多层次时差测量方法主要分粗测和精测两部分,这里粗测采用模拟内插法,精测采用基于长度游标的时间间隔测量法.

(1)粗测.为了兼顾到测量分辨率和测量范围,与脉冲计数法和高分辨率短时间间隔测量方法中的某一种相结合的测量方法对两个 1pps 信号之间的时差测量而言,是非常适用的.基于测量稳定性和复现性以及方法的可操作性方面考虑,采用将脉冲计数法和模拟内插法相结合的时间间隔测量方法,以此来实现两个 1pps 信号之间的时差测量.宽测量范围时间间隔测量

原理如图 11 所示.

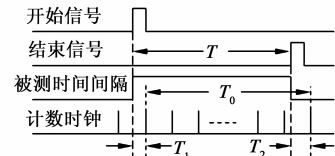


图11 宽测量范围时间间隔测量原理

在图 11 中, T 为被测时间间隔值, T_N 为脉冲计数法计算得到的时间间隔测量结果, T_0 为标频率信号的周期, N_0 为计数值, Δt_1 和 Δt_2 分别代表代表时间间隔的开始信号和结束信号与计数时钟信号之间的不同步部分,即脉冲计数法中存在的量化误差部分,而这两部分短时间间隔值由采用模拟内插法来测量.因此被测时间间隔值可由式 $T = T_N + \Delta t_1 - \Delta t_2$ 计算得到.图 12 是模拟内插法的原理示意图.

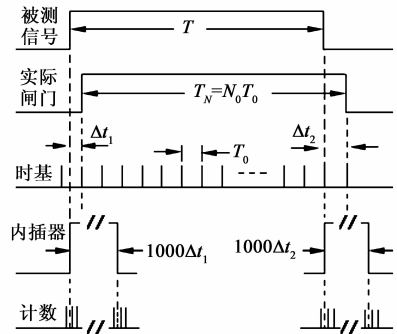


图12 模拟内插法原理

模拟内插法主要包括两部分:一是粗测,二是细测.粗测就是运用脉冲计数法对实际闸门 T_N 的测量;细测就是运用内插的方法对量化单位以下的尾数 Δt_1 和 Δt_2 的测量.细测时运用“起始”内插器将 Δt_1 扩大 1000 倍,即在 Δt_1 时间内用一个恒流源对一个电容器充电,随后以充电时间 $999\Delta t_1$ 的时间放电至电容器原电平.内插时间扩展器控制门由被测起始脉冲开启,在电容器 C 恢复至原电平时关闭,如图 13 所示.

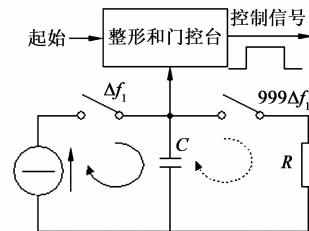


图13 内插器原理

由图 13 可知,内插时间扩展器控制的开门时间为 Δt_1 的 1000 倍.若计数器在 $1000\Delta t_1$ 时间内的计数值为 N_1 ,则 $1000\Delta t_1 = N_1 T_0$,所以有,

$$\Delta t_1 = \frac{N_1 T_0}{1000} \quad (4)$$

同理,中止内插器将实际测量时间 Δt_2 扩展 1000 倍.若计数器在 $1000\Delta t_2$ 时间内的计数值为 N_2 ,则

$1000\Delta t_2 = N_2 T_0$, 故有

$$\Delta t_2 = \frac{N_2 T_0}{1000} \quad (5)$$

由图 12 可知, 粗测计数为 N_0 , 实际闸门 T_N 和被测时间间隔 T_x 的区别仅在于多计了 Δt_2 而少计了 Δt_1 , 故

$$T = T_N + \Delta t_1 - \Delta t_2 = \left(N_0 + \frac{N_1 - N_2}{1000}\right) T_0 \quad (6)$$

(2) 精测. 基于长度游标的时间间隔测量原理如图 2 所示. 其工作原理是: 首先以被测时间间隔的开始信号做开门信号, 结束信号做关门信号, 将开门和关门信号分别整形为窄脉冲信号, 并分别从两组延迟线中通过. 开门信号通过的延迟线的每个线段总是比关门信号通过的延迟线的每个线段的长度要长一些(设定的分辨率值). 同时在每组相应的线段后对两个信号的重合状态进行测量. 由于两路信号的延迟时间不同, 这种延迟的积累最终会使得被测的时间间隔通过长度的延伸出现开、关信号的完全重合. 而装置上设定的长度差的累计就是对于被测时间间隔的准确地反映. 长度游标法的一个很重要的特点是, 测量的分辨率要比两个游标尺的刻度精细的多. 这样, 就可以用并不是在长度上要求很苛刻的装置做出更高分辨率的测量仪器. 图 14 显示了被测短时间间隔和在长度游标设备中两组延迟线之间的长度差的线性度测量值.

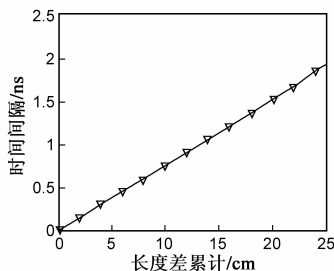


图 14 长度游标短时间间隔实验结果

图 14 给出了长度游标装置中对于开始和结束信号的两个延迟线长度差的累计与被测量的短时间间隔之间对应的实验结果, 可看出, 具有良好的测量线性度和稳定性. 这里变化的时间间隔是在一个周期性信号的基础上利用了另外一个可以调整的延迟线产生的.

通过实验可以看出, 使用这种方法目前可以获得优于 50ps 的测量分辨率. 同样采用微调时间产生器的方法检测了装置的重合检测的稳定度可以达到 10ps. 在本实验中使用了由 OSA 公司生产的 8607 型超高稳定度 BVA OCXO 作为信号源.

4 结论

针对传统时间间隔测量方法中存在的问题, 结合时-空转换关系及异频相位检测原理, 提出了一种适用于导航卫星 1pps 信号的宽范围高分辨率时间同步检测

方法. 该方法将各种相互独立的高精度宽测量范围的测量方法与具有超高分辨的长度游标法联合使用, 设计出一种新的多层次时间间隔测量方案. 利用时间信号在延迟线中快速、准确及稳定传输的特性, 确保了测量的稳定度能够达到 10ps 量级; 通过多种不同测量方法的多层次运用, 以及在 CPU 控制下, 对不同层次下测量结果的延时补偿, 确保了该方案拥有宽的测量范围; 具有可调整的两延迟线的长度微差, 保证了测量的高分辨率性. 当两路延迟线的长度差被设置在毫米级或亚毫米级时, 能够达到 10ps 至 ps 量级的测量分辨率. 在高精度时频测量领域, 测量范围和测量精度很难同时兼顾高指标. 然而, 利用多层次的测量方法, 使高精度的时间间隔测量同时满足了测量范围和高精度的需求, 很好的结合了脉冲计数法、模拟内插法、长度游标法以及一些传统测量方法的优点. 实验表明将该方案应用于导航卫星 1pps 信号的同步检测中, 有效地解决了测量范围和分辨率之间的矛盾, 保证了时间的严格同步、高稳定输出, 对于提高设备体系整体性能具有很大的意义.

参考文献

- [1] Te-Lung Kung, Parhi K K. Optimized joint timing synchronization and channel estimation for OFDM systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications Letters, 2012, 1(3): 149 - 152.
- [2] Abdzadeh-Ziabari H, Shayesteh M G. Robust timing and frequency synchronization for OFDM Systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(8): 3646 - 3656.
- [3] Yang Yang, Blum R S. Phase synchronization for coherent MIMO radar: Algorithms and their analysis [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(1): 5538 - 5557.
- [4] Chin Liang Wang, Hung Chin Wang. Optimized joint fine timing synchronization and channel estimation for MIMO systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59(4): 1089 - 1098.
- [5] Yuzhe Yao, Xiaodai Dong. Design and analysis of timing synchronization in block transmission UWB systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59(6): 1686 - 1696.
- [6] Bin Sheng, Jun Zheng, Xiaohu You, et al. A novel timing synchronization method for OFDM systems [J]. IEEE Transactions on Communications Letters, 2010, 14(12): 1110 - 1112.
- [7] Jian Sun, Huihui Ma, Du Xu. High precision time synchronization scheme for distributed intrusion detection system [A]. 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCSM) [C]. Taiyuan: Conference Publications, 2010. 219 - 223.
- [8] Guo Yi, Liu Gang, Ge Jianhua. A novel time and frequency

- synchronization scheme for OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2008, 54(2): 321 – 325.
- [9] Miao Miao, Zhou Wei, Qu Bayi. Relationship between time interval measurement and frequency sources comparison and its application[A]. 2011 IEEE International Frequency Control and the European Frequency and Time Forum (FCS), 2011[C]. San Francisco: Conference Publications, 2011. 1 – 4.
- [10] Wei Zhou, Xiaojuan Ou, Hui Zhou, et al. A time interval measurement technique based on time-space relationship processing[A]. 2006 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition [C]. Miami: Conference Publications, 2006. 260 – 266.
- [11] 杜保强, 周渭. 基于延时复用技术的短时间间隔测量技术[J]. 天津大学学报, 2010, 43(1): 77 – 83.
Du Baoqiang, Zhou Wei. Short time interval measurement method based on delay-time multiplexing technique[J]. Journal of Tianjin University, 2010, 43(1): 77 – 83. (in Chinese)
- [12] Du Baoqiang, Zhou Wei. Super-high resolution time interval measurement method based on time-space relationships[J]. Chinese Physics Letters, 2009, 26(10): 100601 – 100604.
- [13] Hui Zhou, Wei Zhou. A time and frequency measurement technique based on length vernier[A]. 2006 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition[C]. Miami, FL: Conference Publications, 2006. 267 – 272.
- [14] Miao Miao, Zhou Wei, Wang Bin. Application of length vernier in phase coincidence detection and precision frequency measurement[J]. Review of Scientific Instrument, 2012, 83(2): 024706 – 024708.
- [15] 杜保强, 周渭, 陈法喜, 等. 一种新型超高精度频标比对系统的设计[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(5): 967 – 972.
Du Baoqiang, Zhou Wei, Chen Faxi, et al. Design for novel ultra-high precision frequency standard comparison system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(5): 967 – 972. (in Chinese)
- [16] 杜保强, 周渭. 基于异频相位处理的高精度频率测量系统[J]. 天津大学学报, 2010, 43(3): 262 – 266.
Du Baoqiang, Zhou Wei. High precision frequency measurement system based on different frequency phase processing [J]. Journal of Tianjin University, 2010, 43(3): 262 – 266. (in Chinese)
- [17] Keranen P, Maatta K, Kostamovaara J. Wide-range time-to-digital converter with 1-ps single-shot precision [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(9): 3162 – 3172.
- [18] Daigneault M A, David J P. A high-resolution time-to-digital converter on FPGA using dynamic reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(6): 2070 – 2079.
- [19] Jansson J P, Mantyniemi A. Synchronization in a multilevel CMOS time-to-digital converter [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2009, 56(8): 1622 – 1634.
- [20] Ripamonti Giancarlo, Abba Andrea, Geraci Angelo. High frequency, high time resolution time-to-digital converter employing passive resonating circuits[J]. Review of Scientific Instruments, 2010, 82(5): 0547051 – 0547057.
- [21] Zhou Wei, Du Baoqiang, Li Zhiqi, et al. High-precise frequency measurement and link based on phase group synchronization[A]. 2012 IEEE International Frequency Control Symposium, [C]. Baltimore, MD: Conference Publications, 2012. 1 – 4.
- [22] Dong Shaofeng, Zhou Wei, Du Baoqiang, et al. Ultra-high resolution phase difference measurement method[A]. 2012 IEEE International Frequency Control Symposium [C]. Baltimore, MD: Conference Publications, 2012. 1 – 4.
- [23] 杜保强, 周渭. 基于异频相位处理的新型氢原子频标锁相系统[J]. 电子学报, 2010, 38(6): 1262 – 1267.
Du Baoqiang, Zhou Wei. Novel phase-locked system of hydrogen maser frequency standard based on different frequency phase processing [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(6): 1262 – 1267. (in Chinese)
- [24] 苗苗, 周渭, 李智奇, 等. 用于时间同步的高精度短时间间隔测量方法[J]. 北京邮电大学学报, 2012, 35(4): 77 – 80.
Miao Miao, Zhou Wei, Li Zhiqi, et al. Application research of high-precision time interval measurement on time synchronization [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012, 35(4): 77 – 80. (in Chinese)

作者简介



杜保强 男, 1973 年生于河南民权, 2011 年获得西安电子科技大学博士学位, 博士后, 现为郑州轻工业学院副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为精密时频测控, 信号与信息处理。

E-mail: dubaoqiang@zzuli.edu.cn



刘丹 女, 1986 年生于河南新乡, 现为郑州轻工业学院硕士研究生, 研究方向为信号与信息处理。

E-mail: liudan@zzuli.edu.cn

郭淑婷 女, 1982 年生于河南新乡, 2008 年在西安电子科技大学获得硕士学位, 现为郑州轻工业学院讲师, 研究方向为信号与信息处理、精密时频测控。E-mail: guost@zzuli.edu.cn