

文章编号: 1001 - 893X(2011)08 - 0143 - 04

基于双混频时差法实现时域频率稳定度测量*

谢彦民, 马 煦, 孔 维, 孙海燕

(北京市 5136 信箱, 北京 100094)

摘 要:在对基于 DDS 技术的公共振荡器设计、高速数据传输设计以及基于数字测频技术改进等技术难点分析的基础上, 论述了基于双混频时差法的时域频率稳定度测量方法。该方法可同时测量短期和长期频率稳定度, 测量精度高, 并可进行无间隙测量。

关键词:数字测频技术; 频率稳定度; 双混频时差法; DDS; 无间隙测量

中图分类号: 文献标识码: A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2011.08.030

Time Domain Frequency Stability Measurement Based on Dual - mixer Offset Measurement Method

XIE Yan-min, MA Xu, KONG Wei, SUN Hai-yan

(P. O. Box 5136, Beijing 100094, China)

Abstract: This paper analyses the technical difficulties in the design of the public oscillator based on DDS(Direct Digital Synthesizer) technology, the design of high data transmission and the improvement of the digital frequency measurement technology. On this base, it discusses the time domain frequency stability measurement based on dual-mixer offset measurement method. This method can perform short-term and long-term frequency stability measurement simultaneously and possess the high measurement accuracy and can undertake no-clearance measurement.

Key words: digital frequency measurement technology; frequency stability; dual-mixer offset measurement method; DDS; no-clearance measurement

1 引 言

频率稳定度就是指频率源经过一定时间的预热, 其频率达到某一实际值后保持这个值的能力。频率稳定度是评价信号源质量的重要参数。伴随对频率源需求量的增加, 以及频率源调试的需要, 频率稳定度测量的需求量很大。目前, 各种频率源具备优良的短期稳定度或长期频率稳定度^[1,2], 例如, 高稳定度晶体振荡器的秒级频率稳定度常常可以达到 10^{-11} 到 10^{-12} 量级, 商用小铷原子钟的 100 s 级频率稳定度常常可以达到 10^{-13} 量级, 主动型氢原子钟的万秒级稳定度可达 3×10^{-15} 。频率稳定度时域测量方法有多种, 主要有频差倍增法、差拍法等^[3-5]。

这些测量方法存在的问题是只能针对特殊的点频进行测量, 不能完成对 1 ~ 30 MHz 之间任意频率的测试。若要实现对 1 ~ 30 MHz 之间任意频率进行测试, 需要一个频率合成器, 即利用 5 MHz 或者 10 MHz 等常用的标准频率信号获得一个新的参考源。但频率合成器制造工艺困难, 体积庞大, 引入的噪声和干扰较大, 且输出信号的稳定度较差。本文基于双混频时差法测量频率稳定度能够降低对频率合成器指标要求, 从而实现宽带高精度时域频率稳定度测量。

2 双混频时差法测量频率稳定度可行性分析

频率稳定度具有随机误差的特性, 需利用统计学方法进行估算和处理。在时域中, 频率稳定度表现为

* 收稿日期: 2011 - 04 - 29; 修回日期: 2011 - 08 - 17

信号源输出频率在取样时间内的平均值随时间起伏;在频域中,则表现为信号源输出的频谱不纯。相应的频率稳定度的表征分为频域稳定度和时域稳定度两种,两者有一定的联系。频率稳定度在频域主要用功率谱密度表征,在时域主要用阿仑方差表征。

时域频率稳定度测量可以采用频差倍增法、差拍法或双混频时差法等。若采用频差倍增法,由于倍频器后面往往都必须有相应的滤波器,虽然倍频器和混频器等是宽带的,而滤波器一般都是针对一些频率点设计的,可见频差倍增法不适合用于宽带频率稳定度测量。在差拍法中,由于参考源的稳定度影响而引入的误差是无法避免的,则在参考源的稳定度降不下去即频率合成器性能不过关的情况下,差拍法也不适合用于宽带频率稳定度测量。双混频时差法的一个特点是中介源(也称公共振荡器)引入的误差存在一个抵消效应,即对中介源稳定度的要求远低于差拍法或者频差倍增法中对参考源稳定度的要求,这就降低了对频率合成器的要求,因此双混频时差法更适合用于实现宽带高精度频率稳定度测量。

双混频时差法测量原理如图1所示。

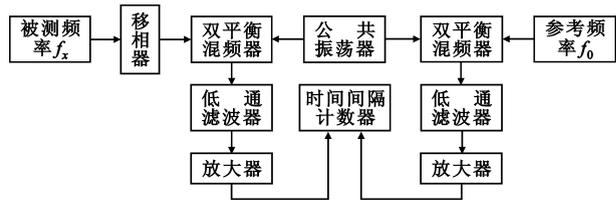


图1 双混频时差法测量原理图

Fig.1 Block diagram of dual-mixer offset measurement method

若设被测频率为 f_x ,公共振荡器的频率为 f_a ,参考频率为 f_0 ,若 $f_x \approx f_0$,则两个双平衡混频器输出的频率也近似相等设为 f_1, f_2 , Δt_{i+1} 和 Δt_i 分别为第 $i+1$ 次和第 i 次测得的 f_1, f_2 之间的相差,则

$$\sigma(\tau) = \frac{f_1^2}{f_0^2} \sum_{i=1}^m \frac{(\Delta t_{i+1} - \Delta t_i)^2}{2m} \quad (1)$$

式中, m 为取样个数,测秒级和10 s级稳定度时一般取 m 为100; τ 为取样时间,若 τ 为1 s,则称测量获得的为秒级稳定度。

设计混频器的输出为1 kHz以上即可使得该系统具有测量毫秒级以上的稳定度的能力。如果 $f_x \approx f_0$,在设计仪器时一般用 $|f_x - f_0| \leq 3$ Hz来代替。实际中,经常存在下列情况之一:参考和被测频率接近(即两者的频差不大于3 Hz),它们都不是标准频率,但它们的稳定度指标相当,则采用上述系统,测

量结果除以1.414即可获得被测信号的频率稳定度;参考频率和被测频率接近相等且参考频率的稳定度优于被测频率3倍以上时,测量结果可以认为是被测信号的频率稳定度; $|f_x - f_0| > 3$ Hz时,还得需要高性能的频率合成器产生参考频率才能完成测试。在高精度频率测量中,一般往往都能满足第一或者第二种情况。

3 双混频时差法测量频率稳定度的关键技术

3.1 公共振荡器设计

上述系统要求一个随被测频率改变而改变的公共振荡器。如前所述,双混频时差法的一个显著的优点是可以抵消公共振荡器引入的噪声和干扰^[3-5],大大降低对公共振荡器的要求。可以采用DDS技术来实现公共振荡器。基于DDS技术设计的频率源的毫秒级稳定度可达 10^{-10} 量级^[6],100 ms级稳定度可达 10^{-12} 量级,秒级频率稳定度可达 10^{-12} 量级,10 s级及以上的频率稳定度和参考源的稳定度基本相当。DDS部分引入的噪声和干扰主要是由于相位的量化误差和幅度的量化误差造成的,这两种误差对长期稳定度的影响很小。如前所述,上述频率稳定度测量系统当参考频率和被测频率相差较大时,需要用一个频率合成器来产生参考信号,而研制此类高性能的频率合成器很困难。基于DDS的频率合成器其输出信号的短期稳定度较差,采用DDS+PLL(锁相频率合成)的频率合成技术有可能解决该问题,即将DDS的输出作为PLL的参考频率,利用PLL对DDS输出参考提纯,获得一个长期稳定度和短期稳定度都比较好的参考源。另一个思路是设计一个专用DDS,降低频率控制字的位数,即可降低对DA速度的要求,但要提高DDS中DA位数。和AD9852比较,专用DDS频率分辨率低,输出频率上限低,量化误差小。在上述设计中,对频率综合器的分辨率要求很低,理论上输出信号的短期稳定度较好。

3.2 时间间隔计数器设计

高精度时间间隔测量方法很多,例如模拟内插法、游标法、量化延迟法、时间电压变换法等^[7]。基于时间电压变化(TVC)的方法设计的时间测量仪的分辨率可达10 ps,测量范围可达3 s,且具有体积小、功耗低、数字化程度高的优势。普通的时间间隔测量方法会存在测量死区,即在一次测量结束后不能马

上开始下一次测量,理论上不能获得无间隙阿伦方差。测量时间指时差测量仪需要测得的时间,它反映了两混频器输出信号的相差;测量准备时间指的是一次测量和下一次测量之间的时间间隔。如图 2 所示,混频器输出信号一般都存在频差,即相位差会发生周期性的变化,测量准备时间越来越小,直到测量准备时间几乎为零,此时测量时间为最大;随后发生一次周期跳动,测量时间几乎为零,而测量准备时间变为最大。如果测量准备时间接近为零,理论上此时不能进行无间隙测量。目前可以采用数字测频技术测相差解决该问题,它由于不存在测量死区可以很容易实现无间隙测量,详细论述可参见 3.4 节。

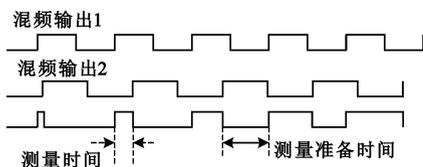


图 2 测量时间和测量准备随时间变化的示意图
Fig.2 Illustration of the variation of measuring time and measuring preparative time with time

3.3 高速数据传输设计

双混频时差法测量得到的数据由于需要进一步的数据处理才能获得不同取样时间的阿伦方差,并且需要作为测试数据资料保存,因此要求测量仪器能和上位机(一般是工控机)进行数据传输。假设测量结果可表示为 10 bit 数据,采用 BCD 编码后则为 40 bit。假设握手信号和数据校验等共占据 20 bit,总共 60 bit。测毫秒级稳定度时测量结果每毫秒就会出现一个,也就是说必须 1 ms 内将 60 bit 发送完,需要的接口速率为 60 kbit/s。通常 RS232 接口、RS485 接口、USB 接口、GPIB 接口、1394 接口、以太网等都可以达到这个速度。与其它接口相比较,RS232 接口的特点是接口设计简单,价格低廉,使用广泛。但是考虑到将来多台稳定度测量仪同时对多个源进行测试并要求所有的测试结果保存在一台上位机上时,RS232 接口无法满足需求。因为 RS232 只能支持点对点通信,并且传输速率较低。RS - 485/422 最大的通信距离约为 1 219 m,最大传输速率为 10 Mbit/s,采用半双工工作方式,支持多点数据通信,一般最大支持 32 个节点。如果使用特制的 485 芯片,可以达到 128 个或者 256 个节点,最大可以支持到 400 个节点。再考虑到成本因素,数据传输采用 RS485 接口比较合适。此类接口设计,可以参考文献[8]。

3.4 基于数字测频技术的改进设计

双混频时差法测量的技术难点之一是必须设法消除时间间隔测量时可能出现的错误。文献[9]给出了时间间隔测量时出现错误的实验现象和数据。时间间隔测量会出现错误是由于数字信号的边沿不可能很小、电路的触发误差及电路受到噪声干扰等多种因素造成的。如图 3 所示,被测信号的一种测量结果是 4 个时钟周期加 T_1 减去 T_2 ;第二种测量结果是 3 个时钟周期加 T_3 减去 T_4 ,第二种情况下时差模块中的计数器和 TVC 模块都是被第一种情况下的时钟脉冲的下一个脉冲触发的,在这两种情况下测量结果都是正确的。但是若存在这种情况,即当被测信号和时钟信号的有效触发沿靠的很近时,时差模块中的计数器被触发了而 TVC 模块没有被有效的触发则会出现测量结果中多减去了一个和时钟周期几乎相等的时间的情形,就出现了错误。消除该错误的一种方法是对被测信号或者参考信号移相,如图 1 所示在被测后面加个移相器。但是移相器一般都是窄带的,当被测频率范围很宽时需要设置多个移相器配合使用。文献[10]给出了一种数字测频的新思路,其基本原理是当被测频率较低时可以采用 AD 转换,借助于幅度信息的相关算法和数字滤波算法,降低触发误差的影响,提高测量精度。由于双混频时差法测量中混频器输出的频率基本为 1 kHz,频率不高,借助于上述思路,采用相同的方法可以对两路混频器输出进行相同的处理。和参考文献[10]不同之处在于,文献[10]是针对一个频率信号进行 AD 转换后测频率,而本文采用两路 AD 同时转换,并对转换结果处理,以求得两路信号的瞬时相差。采用这种思路将很容易获得无间隙阿伦方差而无需硬件上的特殊设计。

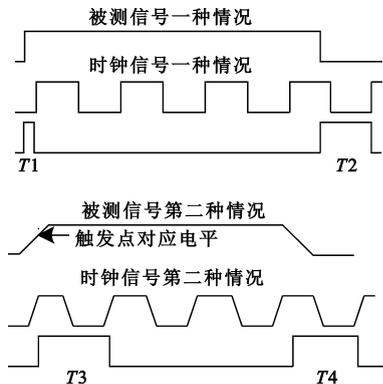


图 3 计数器和 TVC 模块被不同的时钟沿触发示意图
Fig.3 Illustration of counter and TVC module under different burst generators

4 结 论

本文在分析国内外对时域频率稳定度测量方法基础上,提出了基于双混频时差法的高精度宽带时域频率稳定度测量方法。该测量方法的关键技术包括基于DDS技术的公共振荡器设计、时间间隔计数器设计、高速数据传输设计以及基于数字测频技术的改进设计等。基于双混频时差法的时域频率稳定度测量方法可同时进行短期和长期频率稳定度测量,测量精度高,并能完成无间隙测量功能。

参考文献:

- [1] Ken Mochizuki, Masaharu Uchino, Takao Morikawa. Frequency - Stability measurement system using high - speed ADCs and digital signal processing [J]. IEEE Transactions on Instrument and Measurement, 2007, 56(5):1887 - 1893.
- [2] 陈悦,李罗兵. 铷钟电性能测试系统组成及测试能力报告分析[C]//2009时间频率学术会议论文集.成都:四川天奥星华时频技术有限公司,2009:424 - 434.
CHEN Yue, LI Luo - bing. Composition of electrical performance measurement system and analysis of measurement capability of rubidium clock [C]//Proceedings of 2009 Time - frequency Conference. Chengdu: Sichuan XHTF Co., Ltd., 2009: 424 - 434. (in Chinese)
- [3] 陈贵伟,管良朋. 高精度频率稳定度测试仪的研制[C]//2009时间频率学术会议论文集.成都:四川天奥星华时频技术有限公司,2009:338 - 341.
CHEN Gui - wei, GUAN Liang - peng. Development of a high precision frequency stability measurement instrument [C]//Proceedings of 2009 Time - frequency Conference. Chengdu: Sichuan XHTF Co., Ltd., 2009: 338 - 341. (in Chinese)
- [4] 张爱敏,王伟波,宁大愚,等. 双混频时差测量系统不确定度的分析与验证[C]//2009时间频率学术会议论文集.成都:四川天奥星华时频技术有限公司,2009:355 - 359.
ZHANG Ai - min, WANG Wei - bo, NING Da - yu, et al. Analysis and validation of measurement indefiniteness of dual - mixer time difference measurement system [C]//Proceedings of 2009 Time - frequency Conference. Chengdu: Sichuan XHTF Co., Ltd., 2009: 355 - 359. (in Chinese)
- [5] 杨同敏,李春景,高连山,等. 小型高精度频率比对器的研制[C]//2009时间频率学术会议论文集.成都:四川天奥星华时频技术有限公司,2009:349 - 354.
YANG Tong - min, LI Chun - jing, GAO Lian - shan, et al. Development of a small high precision frequency comparing device [C]//Proceedings of 2009 Time - frequency Conference. Chengdu: Sichuan XHTF Co., Ltd., 2009: 349 - 354. (in Chinese)
- [6] 屈八一. CPT原子钟、星载钟及时频测控领域的新技术研究[D].西安:西安电子科技大学,2010.
QU Ba - yi. The new technology research in CPT atomic

clock, satellite - borne clock and time - frequency measurement and control field [D]. Xi' an: Xidian University, 2010. (in Chinese)

- [7] 屈八一,周渭,陈发喜. 高精度时间间隔测量仪的研制[J]. 仪器仪表学报,2009,30(7):1476 - 1480.
QU Ba - yi, ZHOU Wei, CHEN Fa - xi. Development of high precision time interval measurement module [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(7): 1476 - 1480. (in Chinese)
- [8] 陈跃飞,樊利民. 基于RS - 485总线的电子设备测控系统的设计[J]. 电子技术,2008,45(1):15 - 18.
CHEN Yue - fei, FAN Li - min. Automatic Test System Based on RS - 485 Bus [J]. Electronic Technology, 2008, 45(1): 15 - 18. (in Chinese)
- [9] 史丰丰,李大勇,张小朋,等. 改进的原子钟实时相位同步技术[C]//2009全国时间频率学术会议论文集.成都:四川天奥星华时频技术有限公司,2009:435 - 439.
SHI Feng - feng, LI Da - yong, ZHANG Xiao - peng, et al. An Improved Atomic Clock Real - time Phase Synchronous Technology [C]//Proceedings of 2009 Time - frequency Conference. Chengdu: Sichuan XHTF Co., Ltd., 2009: 435 - 439. (in Chinese)
- [10] 刘娅,李孝辉,王玉兰. 一种基于数字技术的多通道频率测量系统[J]. 仪器仪表学报,2009,30(9):1963 - 1968.
LIU Ya, LI Xiao - hui, WANG Yu - lan. Multi - channel frequency measurement system based on digital signal processing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(9): 1963 - 1968. (in Chinese)

作者简介:

谢彦民(1966—),女,山西芮城人,硕士,高级工程师,长期从事卫星导航及时间频率研究;

XIE Yan - min was born in Ruicheng, Shanxi Province, in 1966. She is now a senior engineer with the M. S. degree. Her research concerns satellite navigation and time - frequency.

马煦(1968—),男,河北秦皇岛人,硕士,高级工程师,长期从事卫星导航定位工作及差分基准站研究;

MA Xu was born in Qinhuangdao, Hebei Province, in 1968. He is now a senior engineer with the M. S. degree. His research concerns satellite navigation, positioning and differential reference station.

Email: greatmaxu@126. com

孔维(1980—),女,河南南阳人,硕士,工程师,主要从事卫星导航定位及差分基准站工作;

KONG Wei was born in Nanyang, Henan Province, in 1980. She is now an engineer with the M. S. degree. Her research concerns satellite navigation and differential reference station.

Email: kwnancy@126. com

孙海燕(1975—),女,博士,工程师,长期从事卫星导航及时间频率研究。

SUN Hai - yan was born in 1975. She is now an engineer with the Ph. D. degree. Her research concerns satellite navigation and time - frequency.