

文章编号: 1001-893X(2011)10-0109-04

基于 GPS 驯服铷钟的频率校准系统设计*

马 煦, 孔 维, 孙海燕

(北京市 5136 信箱, 北京 100094)

摘 要: 定期对 GNSS 接收机的外部频率源进行校准是保证定位精度的重要措施。介绍了 GPS 驯服铷钟频率校准系统的工作原理和硬件组成, 通过频率校准实验验证了该系统达到了较好的长期频率准确度和短期频率准确度指标要求, 保证了被校准频率源的精确度。

关键词: GNS 接收机; 频率校准; GPS 驯服铷钟; 时差测量

中图分类号: TN945.17 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2011.10.022

Design of a Frequency Calibration System Based on GPS Disciplined Rubidium Clock

MA Xu, KONG Wei, SUN Hai-yan

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

Abstract: Periodical calibration of frequency standard for GNSS receiver is an important measure to guarantee the positioning precision. The working principles and hardware structure of frequency calibration system based on GPS disciplining Rubidium clock are introduced. The frequency calibration experiment validates that this system has achieved the preferable long frequency accuracy and short frequency accuracy, which ensures the calibrated frequency standard precision.

Key words: GNSS receiver; frequency calibration; GPS disciplined Rubidium clock; time difference measurement

1 引 言

GNSS 基准站主要用于为卫星导航系统提供广域差分数据, 用于区域精密定位和导航增值服务。为了实现该功能, GNSS 基准站都配有高精度的铷原子频标为 GNSS 接收机采集数据提供高精度时间频率标准, 铷原子频标的工作性能直接影响用户的导航定位精度。铷原子钟在长期使用过程中存在较大频率漂移, 普通铷原子频标的漂移率指标为每月小于等于 5×10^{-11} , 因此需要对铷原子钟定期进行频率校准^[1], 以确保其工作完好性和各项指标的真实性和准确性。目前, 频率标准源测试校准系统存在

成本高、测试周期长、精度低、不便于携带、依赖于实验室等缺点^[2-3], 为此设计研制了一套集成度高、易于携带, 测试校准精度高、可靠性好的 GPS 驯服铷钟的频率校准系统。本文对该系统的设计进行了深入探讨。

2 系统工作原理及硬件设计

GPS 驯服铷钟频率校准系统将 GPS 驯服铷原子频率标准、高稳石英晶振、频率分析模块和专用测试软件集成在机箱内, 组成一个具有高精度参考源的频率校准系统。系统利用 GPS 提供的精确 1 PPS 信号对铷原子频率标准进行驯服来获取频率准确度,

* 收稿日期: 2011-04-11; 修回日期: 2011-09-22
基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目
Foundation Item: The National High-tech R&D Program(863 Program) of China

并利用铷原子频率锁定高稳石英晶体振荡器,因此同时提高了系统频率长期稳定性和短期稳定性两个指标,再利用频率测试模块获取准确可靠的测量数据,并对测试和校准数据进行采集、存储和显示。

系统由频率参考源分系统、频率测量分系统、控制与显示分系统组成,含操作能力的控制系统通过数据总线分别与频率参考源分系统、频率测量分系统和显示系统连接。系统组成如图 1 所示。

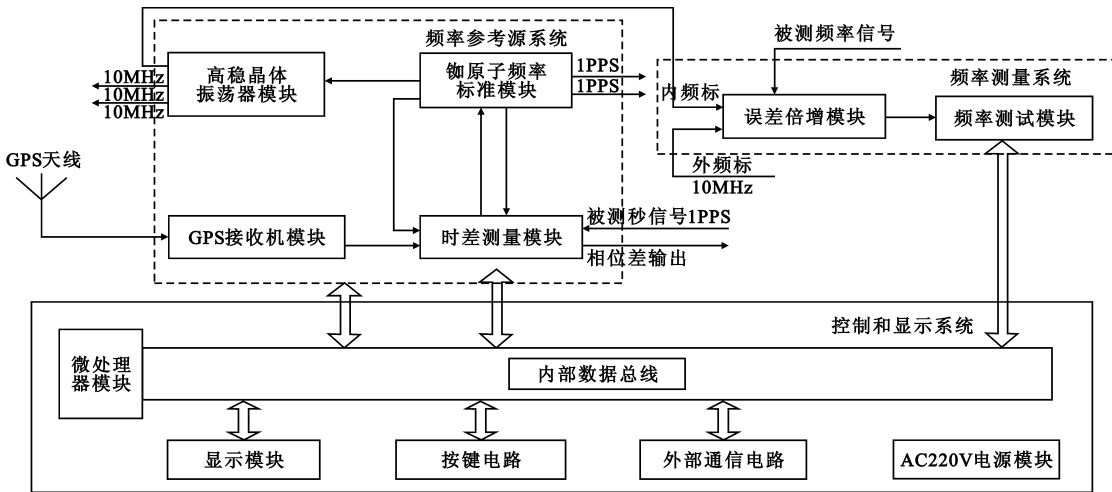


图 1 GPS 驯服钟频率校准系统硬件组成

Fig.1 Block diagram of the GPS disciplined Rubidium clock frequency calibration system

2.1 频率参考源分系统

频率参考源分系统中的 GPS 接收机模块和铷原子频率标准模块同时与时差测量模块连接,铷原子频率标准模块与高稳晶体振荡器模块连接,时差测量模块同时测量 GPS 接收机模块和铷原子频率标准模块分别输出的 1 PPS 秒信号,得到的时差值通过数字锁相电路和 D/A 转换及滤波电路产生控制信号,控制铷原子频率标准模块,铷原子频率标准模块产生的标准频率信号控制高稳晶体振荡器模块,输出高准确度和高稳定度的标准频率和脉冲信号。频率参考源分系统模块组成如图 2 所示。

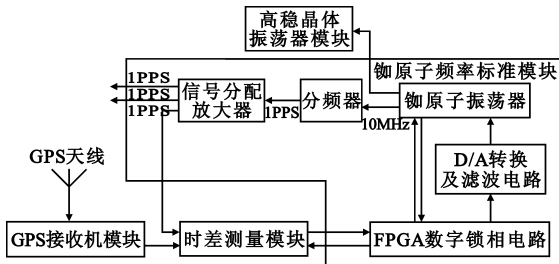


图 2 频率参考源分系统模块组成图

Fig.2 Block diagram of the frequency reference source sub-system

通过 GPS 天线接收 GPS 信号,产生 GPS 时间信息和 1 PPS 信号,时间信息为系统提供精确的时间信息; 1 PPS 信号用于驯服铷原子振荡器。将 GPS 接收机产生的 1 PPS 信号与铷原子频率标准产生的 1 PPS 信号同时输入时差测量模块,并将时差测量模块输出信号输入 FPGA 数字锁相电路,产生对铷原子振荡器的驯服信号,并通过 D/A 转换及滤波电路输入至铷原子频率标准模块,完成对铷原子振荡器的驯服功能。GPS 驯服铷原子振荡器能提高铷原子振荡器输出频率信号的准确度,将铷原子频率标准驯服在 GPS 信号的精度上。并且,由于铷原子振荡器具有很小的漂移率,因此当 GPS 信号丢失时,利用铷原子频率标准的低漂移特性使输出频率在一定的时间范围内保持很高的精度。GPS 信号驯服铷原子振荡器需要克服 GPS 秒信号的抖动提高短期稳定性,采用多次平均和标准偏差的概率估算法以及数字滤波的方式,可以很好地平滑 GPS 的随机抖动(100 ns 的抖动)。驯服铷钟采用频率控制相位的原理,即射频和秒信号的相位相参。通过高精度的秒信号时差测量,获得铷钟输出频率的准确度值,根据其数值在单片机的控制下设置频率微调量,当频率准确度驯服到 3×10^{-12} 范围内后,根据时差测量得相位偏移量,用超精细的频率微调(1×10^{-12} 单步)控制相位同步

GPS 信号驯服铷钟工作原理如下:GPS 接收机

精度。高精度时间间隔测试采用内插脉冲测量技术(分辨率为0.5 ns)可以获得很高的相位测量精度。

铷钟锁定高稳定度晶振工作原理如下:铷原子频率标准产生的标准频率信号和高稳晶体振荡器产生的频率信号输入鉴相器,产生锁定信号并通过低通滤波器输入高稳晶体振荡器,使高稳晶体振荡器输出具有短期高稳定度的标准频率信号。铷原子振荡器锁定高稳定度晶振提高了输出标准频率信号的短期稳定度,使其既具备高准确度又具备高稳定度。铷原子振荡器锁定晶振的环路,系统采用了窄带环路技术和电压跟踪扫描技术,有效地解决了环路的锁定带宽和输出频率的相位噪声和频率稳定度的问题。

时差测量模块工作原理如下:采用了特殊的双时差测量技术和内插脉冲测量技术,很好地解决了信号抖动的确定度以及内部处理过程中时延对测量绝对

精度的影响。可以在一次测量中完成被测秒信号的多参数测量,对于高精度的时间测量非常有效。驯服铷钟采用频率控制相位的原理,即射频和秒信号的相位相参。通过高精度的秒信号时差测量,获得铷钟输出频率的准确度值,根据其数值在单片机的控制下设置频率微调量,当频率准确度驯服到 3×10^{-12} 范围内后,根据时差测量得相位偏移量,用超精细的频率微调(1×10^{-12} 单步)控制相位同步精度。

2.2 频率测试分系统

频率测试分系统是系统获得准确可靠测量数据的有效保证,其中误差倍增模块将外部输入的被测频率信号进行信号合成,并将其与频率参考源分系统输出的标准频率信号的差值和放大倍数相乘,从而将差值信号的误差放大,频率测试模块完成该差值信号的测量。频率测试分系统模块组成如图 3 所示。

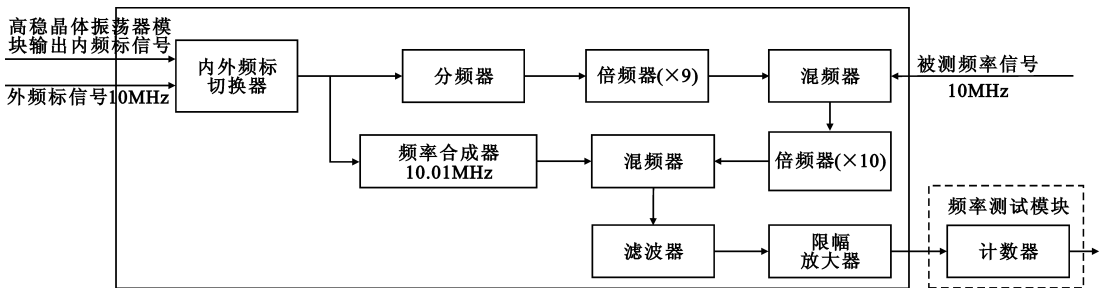


图 3 频率测试分系统模块组成图
Fig.3 Block diagram of the frequency test sub - system

误差倍增模块主要作用是提高系统的测试精度,由于现用计数器的填充脉冲频率为100 MHz左右,所以1 s闸门的测量精度只能为 1×10^{-8} 。当被测频率的准确度小于 1×10^{-8} 时,测试值的末尾只能显示0或者1,而不能准确地反映被测频率的准确值,因此需要将此信号的误差放大。通过乘法器电路的性质得知:如果被测频率和标准频率能差出一个 $1 \text{ kHz} + \Delta F$ (ΔF 为被测信号与标准信号的差值,如果计数器的位数不够,就不能准确地反应被测信号的频率准确度),就可以通过此测量值和放大倍数相乘得到被测信号的准确值,由此提高1 s的测试精度到 1×10^{-12} (误差倍数 x 为10 000倍,填充脉冲为100 MHz)。

频率测试模块采用等精度测频的方式,保证测试的频率差和被测频率保持高度的一致性。按测量原理可分为计数器法和相位测试法。在频率测量时,如前所述,1s 闸门的测量精度只能为 1×10^{-8} ,

当被测频率的准确度小于 1×10^{-8} 时,这个精度显然不能满足测量的需要。在工程技术上采用的误差倍增和差拍多周期法是一种最简单实用的方法,但误差倍增受电路噪声的制约,不利于高次误差倍增,为了获得足够高的测量精度以及简单实用和测量指标具有一定高的提升空间,系统采用了低倍增次数、合理的差拍频率和很高的频率测量精度的频率计。误差倍增法的核心是采用频率倍频技术和混频技术,使被测信号的频率误差倍增。

2.3 控制与显示分系统

控制与显示分系统中的微处理器模块控制系统各部件的工作状态,并通过数据通信模块的内部数据总线实现频率参考源系统和频率测量系统中模块以及显示模块之间的数据交换,数据通信模块还完成外部数据交换功能,频率测量模块的测量结果通过数据通信模块输入到数据处理模块进行数据处理,得到对被测频率信号的计算数据,并通过显示模

块进行显示,模块组成如图 1 所示。

3 频率校准试验

利用基于 GPS 驯服铷钟的频率校准系统,我们多次对 GNSS 基准站上的铷原子频标进行了测试和校准。被测铷原子频标频率准确度已经漂移至 1×10^{-9} 以下,表 1 和表 2 给出了经过 6 h 测试跟踪后,被测铷原子频标频率准确度分别在 1 s、2 s、4 s、10 s、50 s、100 s 时段和频率稳定度分别在 1 ms、10 ms、20 ms、100 ms、1 s、10 s、100 s 时段的结果。

表 1 频率校准试验结果(频率准确度)	
Table 1 Frequency calibration test result(frequency accuracy)	
闸门时间/s	频率准确度平均值
1	-4.60×10^{-11}
2	-2.90×10^{-11}
4	-2.90×10^{-11}
10	-2.920×10^{-11}
50	-2.932×10^{-11}
100	-2.916×10^{-11}

表 2 频率校准试验结果(频率稳定度)	
Table 2 Frequency calibration test result(frequency stability)	
闸门时间/ms	频率准确度平均值
1	1.61×10^{-9}
10	1.65×10^{-10}
20	7.66×10^{-11}
100	3.80×10^{-11}
1000	8.01×10^{-12}
10000	1.67×10^{-12}
100000	3.47×10^{-13}

GPS 驯服铷原子振荡器频率测试系统中 GPS 信号锁定状态频率准确度小于 1×10^{-12} ,保持状态频率准确度小于 3×10^{-12} ,频率稳定度小于 $4 \times 10^{-12}/10\text{ s}$,小于 $5 \times 10^{-12}/12\text{ s}$,满足测试设备的精度比被测信号精度至少高 3 倍的要求。被测设备经校准后能够恢复到设备出厂指标,提高了实时数据源的测量精度,确保了系统用户进行精密定位的可靠性。

4 结束语

本文详细介绍了基于 GPS 驯服铷钟的频率校准系统研制工作原理和硬件设计,并根据频率校准试验结果验证了校准系统的工作性能。经过 GPS

驯服铷钟和铷钟锁定高稳晶振两个重要技术手段同时提高了系统长期频率稳定度和短期频率稳定度指标,测试和校准结果表明该系统频率长期稳定度和短期稳定度指标以及频率准确度指标接近铯钟水平,并具有体积小、重量轻、价格低的优势,能够满足 GNSS 基准站原子钟以及多种时间频率设备测试校准需要。

参考文献:

[1] 蔡勇,林传富,沈季良.高精度原子钟频率稳定度测试仪的研制[J].中国科学院上海天文台年刊,2000(21): 148-152.
CAI Yong, LIN Chuan-fu, SHEN Ji-liang. The Developments of High Precision Frequency Stability Test Equipments for Atomic Frequency Standard[J]. Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica,2000(21):148-152. (in Chinese)

[2] 杨旭海,翟惠生,胡永辉,等.基于新校频算法的 GPS 可驯铷钟系统研究[J].仪器仪表学报,2005(1):41-44.
YANG Xu-hai, ZHAI Hui-sheng, HU Yong-hui, et al. Study on GPS Disciplined Rb Clock Based on New Frequency Accuracy Measurement Algorithm[J]. Journal of Apparatus and Instrument, 2005(1):41-44. (in Chinese)

[3] 郭向阳,赵振杰.自适应驯服铷钟的实现[J].飞行器测控学报,2006,8(4):83-86.
GUO Xiang-yang, ZHAO Zhen-jie. The Implementation of an Adaptive and Tame Rubidium Clock[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2006, 8(4):83-86. (in Chinese)

作者简介:

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研究方面的工作;
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,湖北武汉人,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 Wuhan, Hubei Province, in 1975. She is now an engineer with the Ph.D. degree. Her research concerns satellite navigation & time and frequency.