

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2019-04-0301-09

国产皮秒级多通道时间间隔 测量仪在工程中的应用

潘峰¹, 张军², 霍海强³, 陈明², 陈洪卿³

(1. 北京卫星导航中心, 北京 100094;
2. 北京一朴时频科技有限公司, 北京 100086;
3. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 石家庄 050002)

摘要: 介绍国产皮秒级商用多通道时间间隔测量仪 (MTIM) 在我国卫星导航系统和时间频率体系工程中的应用和发展历程, 给出国产 MTIM 测量仪与外国知名品牌 MTIM 测量仪进行对比测量的技术方案, 并对比测数据进行统计分析。比测结果表明: 国产 MTIM 测量仪的测量分辨率优于 10 ps, 测量噪声 < 15 ps, 测量不确定度 < 20 ps, 通道固定时延随温度变化的温度系数 < 1 ps/°C; 其性能与国外知名同类产品相当, 可以替代在工程中的应用。

关键词: 皮秒; 多通道时间间隔测量仪; 卫星导航系统; 时间间隔; 测量

Homemade multi-channel time interval meter (MTIM) for ps measurements using in project of satellite navigation system

PAN Feng¹, ZHANG Jun², HUO Hai-qiang³, CHEN Ming², CHEN Hong-qing³

(1. Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China;
2. Beijing Yi-pu Time Frequency Technology Company, Limited, Beijing 100086, China;
3. 54th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050002, China)

Abstract: It has been introduced the application and development of homemade picosecond commercial multi-channel time interval meter (MTIM) in engineering application of satellite navigation and the time-frequency systems. The technical scheme of comparison measurements between the homemade MTIM and those of foreign well-known MTIM equipment is given, and the comparative measurement data have been analyzed statistically. The results show that the homemade MTIM equipment performs very well as following: resolution, < 10 ps; noise, < 15 ps; uncertainty, < 20 ps; temperature coefficient, < 1 ps/°C. It comes to a conclusion that the homemade commercial MTIM equipment is as good as those of foreign well-known MTIM equipment and may replace those in engineering application.

Key words: picosecond (ps); multi-channel time interval meter (MTIM); satellite navigation system; time interval (TI); measurement

收稿日期: 2019-06-17; 接受日期: 2019-09-05

作者简介: 潘峰, 男, 研究员, 主要从事卫星导航与时间频率应用研究。

0 引言

时间 (time) 的含义包括时刻和时间间隔 (time interval, TI), 用以表达事物出现的先后及其发展变化的快慢。它为事物的运动和时序过程的测量及研究提供了必不可少的参考坐标。时间及其间隔 (TI) 测量技术在激光测距、卫星导航定位、航空航天、天文观测、遥测遥控、电信、电力、网络安全等诸多领域的应用越来越广^[1-3]。科技和诸多应用发展又对 TI 的测量精度不断提出新要求, 从毫秒 (ms)、微秒 (μs) 提高到纳秒 (ns)、皮秒 (ps), 甚至飞秒 (fs)、阿秒 (as)^[4-6]。美国每年都有精密时间和时间间隔 (PTTI) 系统和应用学术会议, 研讨精密时间和 TI 测量技术与应用。美国国家科学院把它作为评估国家国防力量的重要标志。我国在 20 世纪末部分单位也相继开展了高精度 TI 测量技术和方法的探索研究^[7-9], 但是当时国内 TI 测量精度好于 1 ns 的商用设备市场基本是国外几家仪器商的天下。21 世纪初, 随着电子科技、器件飞跃发展, 在不断跟踪、努力探索的基础上, 我国开始了迈向国产商用设备 TI 测量精度好于 1 ns 的研发征程^[10-13]。

21 世纪初, 中国电信数字同步网技术支撑中心为保证数字同步网与国际、国内电信网络精确时间频率同步, 开展了精密时间、TI 测量设备研发与产业化之路。2004 年在国防科工委重点预研项目《GNSS 系统中相对论修正改进》中, 为推进和验证卫星系统运行中的相对论效应改正及其对卫星原子钟信号(向地面)传输、接收的影响^[13], 又承担了精度优于 1 ns 的高精度 TI 计数器研制。2006 年 5 月, 该项目通过国防科工委专家组验收鉴定, 评价为“达到国际先进水平”。该项目成果在 2005 年全国时间频率学术年会论文“皮秒时间间隔测量方法综述”中进行了全面介绍, 并就计数器法、时间扩展法、时间-幅度转换伴随模拟-数字信号转换法、游标法、利用分支的延迟线转换法、内插值法等多种影响高精度 TI 精确测量的方法和技术作了详细描述^[7]。2007 年国产皮秒级 TI 测量仪研制产品在北京卫星导航中心测试、试用, 并不断进行技术改进与工艺完善, 被定型为国内首款工程应用的 MDA712 型皮秒级 TIM (time interval meter) 测量仪。

MDA712 产品的原理如图 1 所示。

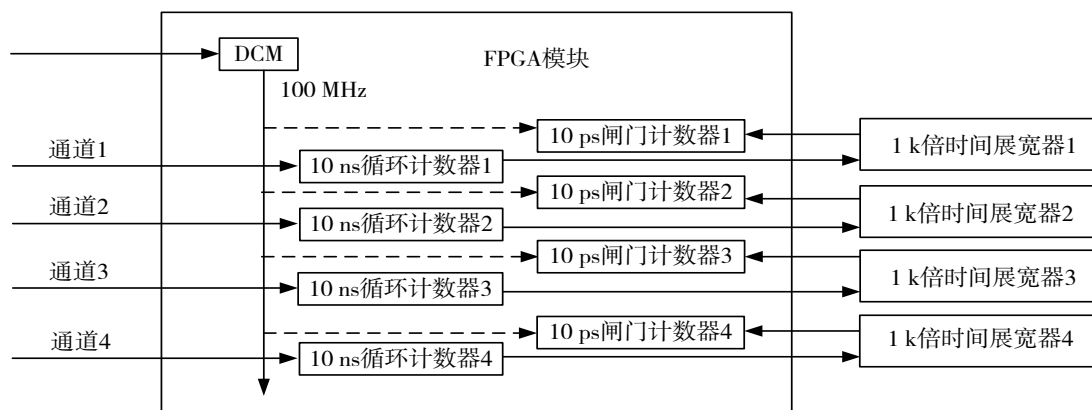


图 1 MDA712 原理框图

产品中有两类计数器: 一个是 32 位循环计数器, 形成一个计时分辨率为 10 ns, 周期为 $10 \text{ ns} \times 2^{32} = 42.949\ 672\ 960 \text{ s}$ 的本地时标; 另一类计数器是闸门计数器, 该计数器与 1 k 倍时间展宽器共同形成了一个对被测信号 10 ns 分辨率内残余脉宽进行 10 ps 分辨率测量。产品中 1k 倍时间展宽器采用 3 次 10 倍展宽完成, 其特点如下: ① 采样间隔大幅降低, 最高采样可达 1 MHz 采样/s; ② 电容放电最长时间由 10 μs 变成了 100 ns, 电容放电非线性度得到大幅提高。该方法申请了名为“一种多次同步模拟内插的

时间间隔测量方法和装置”的发明专利（专利号：ZL 2010 1 0562836.2）。

1 国产皮秒 TIM 测量仪在北斗试验系统中的应用

北斗试验系统地面控制中心时统分系统需要对多个原子钟输出信号做长期不间断的、优于 0.1 ns 的测量不确定度 TI 测量。当时该系统用的是美国 Stanford 公司 SR620 型 TI 测量仪。长期监测发现各原子钟之间的钟差数据有明显的周期性漂移起伏，影响系统总体测量误差和系统的性能指标。为此，研究分析钟差数据异常起伏是来自原子钟还是 TI 测量仪，成为必须解决的问题。2009 年采用两台 MDA712 型国产皮秒级商用 TIM 测量仪与 SR620 测量仪同时对原子钟信号进行了对比验证测量，验证测试连接框图见图 2。

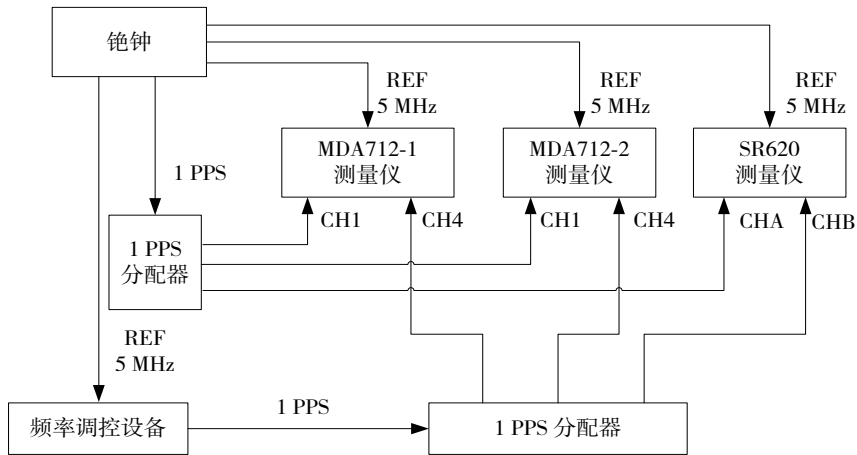


图 2 时间间隔长期对比测试的连接框图

3 台设备同时测量相同的原子钟信号 10 d，获得的 TI 测量曲线见图 3 至图 5。3 者都有约 1 ns 的长期慢变化。两台 MDA712 设备的测量结果，有约 0.1 ns 的不规则起伏，没有周期性的漂移起伏。而 SR620 设备的 TI 测量曲线，在长期趋势上与 MDA712 设备相似，但每隔约 35 000 s 就出现变化幅度约 0.5 ns 的周期性起伏。为避免线缆或其他原因误判，3 台设备进行了测试端口互换测量，测量结果没有随着端口转移而转移。测量结果表明，原子钟钟差曲线存在 0.5 ns 的周期性变化，源自 SR620 测量仪。

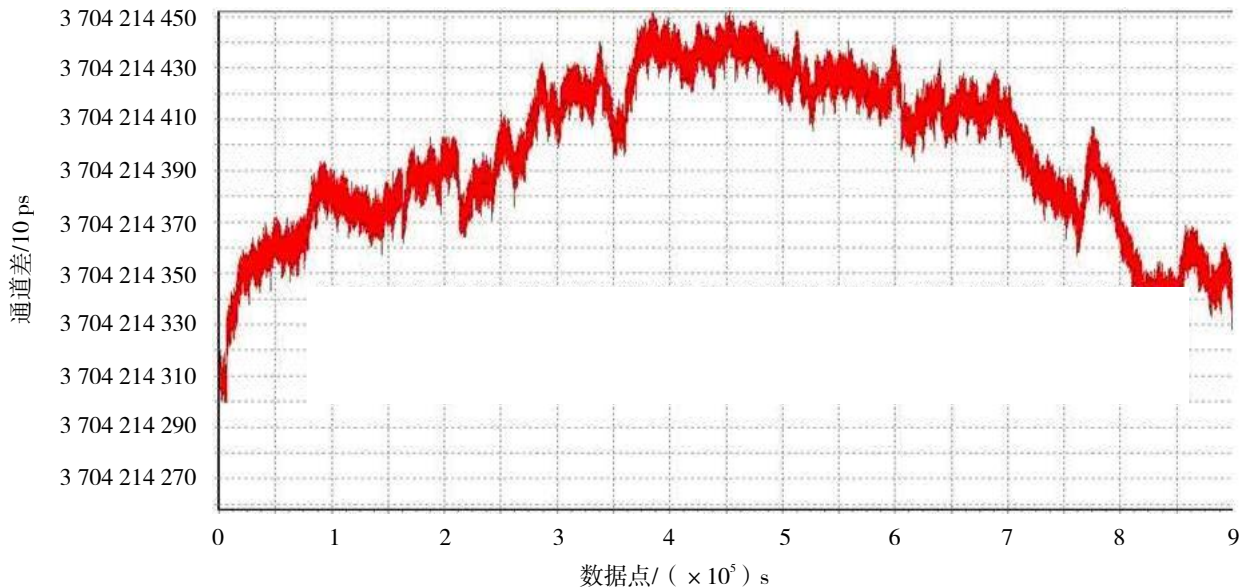


图 3 MDA712-1 TIM 测量仪测得的 TI 曲线

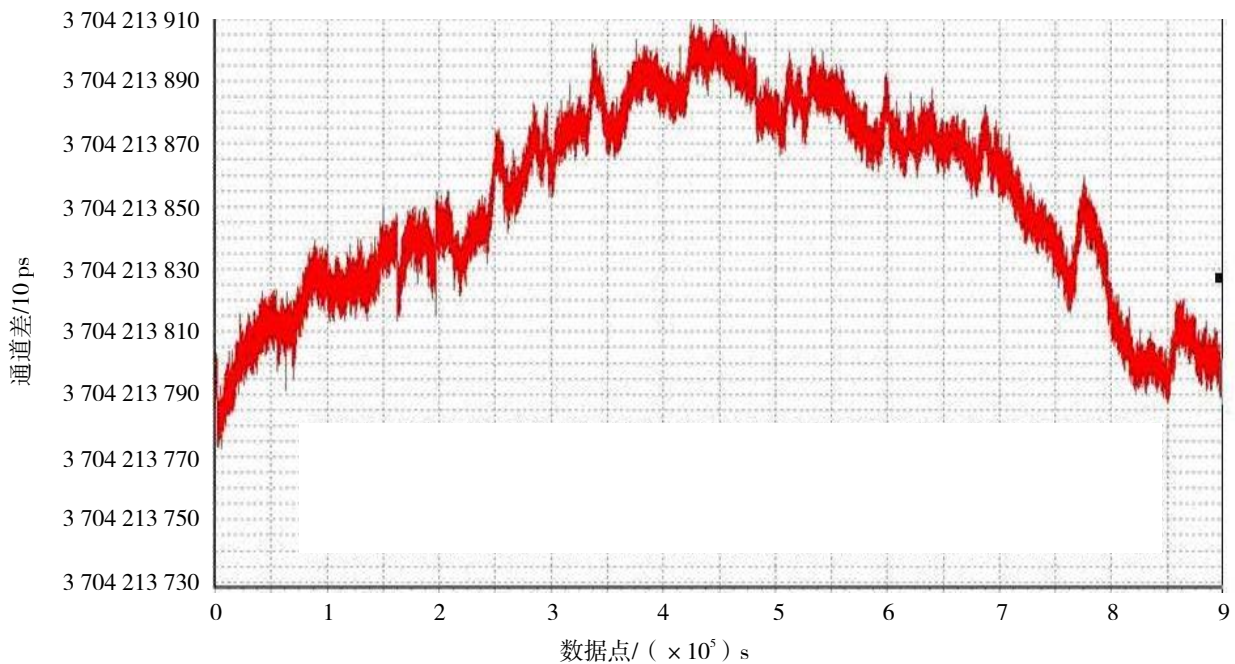


图 4 MDA712-2 TIM 测量仪测得的 TI 曲线

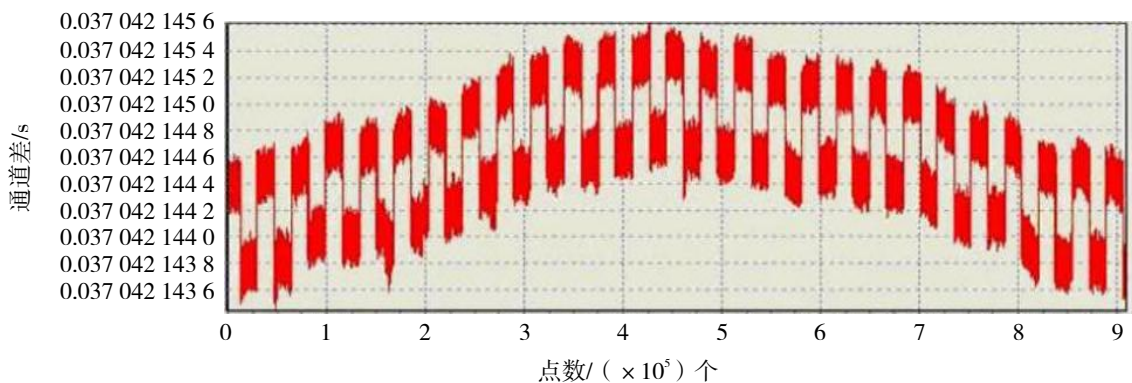


图 5 SR620 TIM 测量仪测得的 TI 曲线

上述测试结果及其后续研究工作, 于 2010 年在《电子测量与仪器学报》发表“皮秒级时间间隔测量精度检定方法的研究”文章^[2], 并于 2016 年申请了国家发明专利“受控频偏时间间隔连续检测方法”(专利号 2016010021523.3)。在专利技术和工程应用实际经验多年累积的基础上, 开拓创新, 从 4 通道 MDA712 型 TIM 测量仪拓展为 16 通道同时精密测量, 研制成商用皮秒级 MTIM (multi-channel time interval meter) 一多通道时间间隔测量仪。随着不断的技术改进与工艺完善, “国产商用皮秒级 TIM 测量仪”可靠性与稳定性逐步提高, 得到工程应用认可, 并且作为《高精度多通道时间间隔测量仪的研制》项目的成果, 获得国家科技部授权、由中国卫星导航定位协会颁发的“2012 年卫星导航定位科技进步一等奖”^[4]。

2 国产 MTIM 测量仪在北斗试验验证系统中的应用

在北斗试验验证、地面控制、时间频率系统中, 采用德国 TIMETECH 公司高精度多通道 MTIC 测量仪, 对多台原子钟输出信号进行测量; 同时用另一台 16 通道国产皮秒级 MTIM-712B 测量仪与 MTIC 测

量仪进行了比测，数据采集达6年多。2016年对MTIM-712B和MTIC测试仪测得的钟差数据进行处理和比较时，发现两台设备的测量数据结果存在部分不一致性。为了搞清楚不一致的原因，从数据库中选择2016年4~6月的多组钟差实测数据，进行统计分析，现选取其中能说明问题的一组TI测量数据曲线图，如图6所示。

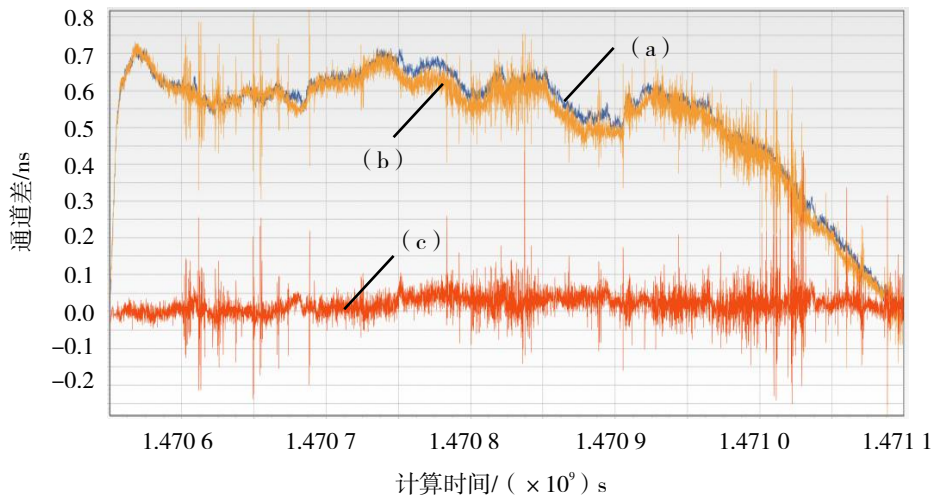


图6 MTIM-712B与MTIC的TI比对测量结果

图6中，曲线(a)是MTIM-712B测量仪测得的一组钟差，曲线(b)是MTIC测量仪测量同组原子钟的钟差曲线，曲线(c)则是两者钟差的差值曲线。从图6中，不难看出曲线(c)有时出现的较大起伏，都与曲线(b)所出现的较大起伏一一对应，而对应时段的曲线(a)则相对平稳，未有较大起伏。截取两个月内的测量数据，获得十多组钟差曲线，都与图6曲线大同小异。从钟差数据统计分析结果，可以分析被测原子钟的性能，同时，通过比测的方式也可用于评估国产MTIM测量仪在工程应用中的长期运行的稳定性和可靠性。多年钟差测量数据分析表明，MTIM-712B测量仪的性能略优于TIMETECH测量仪^[5]，参见表1。

表1 两种TI测量仪的长期测量误差的汇总评估

设备名称	TIMETECH 商用 MTIC 设备	国产商用 MTIM712B 设备	两者不一致性
不确定度 (MAX-100)	< 50	< 50	< 88
测量噪声 (RMS)	< 30	< 30	< 43
固定时延性能	< 29	< 29	< 29
性能的稳定性	有瑕疵，出现8次异常数据和突发噪声变大现象	性能良好，没有性能异常现象	-

3 国产MTIM测量仪在国产铯钟研发中的应用

国产MTIM测量仪在国产商品小铯钟的研发测试中，也发挥了重要的作用。2016年，在北京卫星导航中心用2台日稳定度优于 6.5×10^{-15} 的氢钟为参考源，采用国产MTIM-712测量仪和MFC-712多通道高精度频标比对仪各两台，同时对4台国产商品小铯钟A、B、C、D输出的5 MHz/10 MHz信号和1 PPS信号进行比对测量，测试框图见图7所示。根据测量数据进行幂律谱分析，评估国产铯钟的频率稳定度、准确度和频率漂移。测量数据统计结果表明，国产铯钟输出1 PPS和频率信号测量结果具备良好的一致性。铯钟A的秒稳为 1.9×10^{-12} ，5 d的频稳为 9.9×10^{-15} ，达到优质管5071A的指标；铯钟B的性能接近优质

管 5071A 的指标；铯钟 C、D 的性能都与普通 5071A 的指标相当^[6]。目前，国产 MTIM 测量仪被北京大学等单位用于商品小铯钟和芯片原子钟的研制。

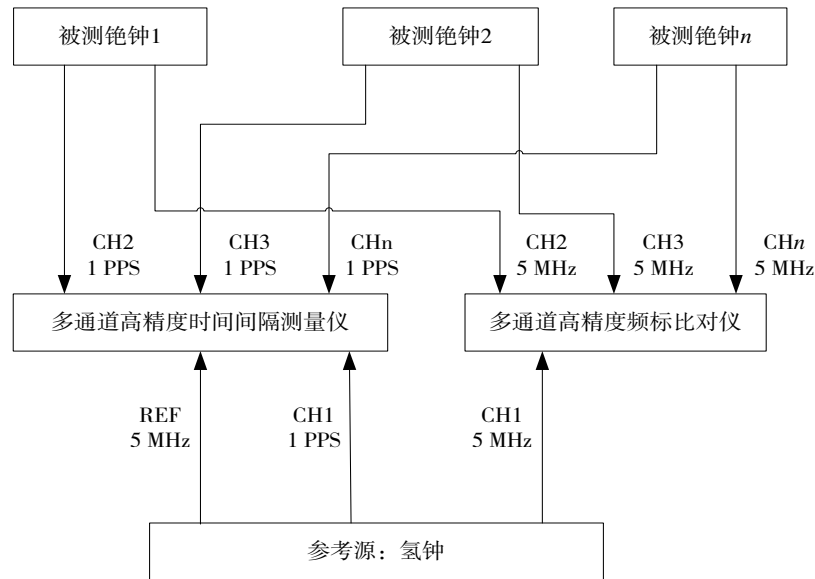


图 7 国产 MTIM 测量仪用于铯钟比测连接框图

4 国产 MTIM 测量仪用于北斗导航定位系统工程建设

北斗导航定位系统地面控制系统对所有测量设备在环境适应性上提出了更高的要求，特别是对 MTIM 设备因温度变化引起测量性能的变化非常关注。在系统中使用的 MTIM 设备，除了对其测量噪声、测量不确定度、通道固定延迟不一致性提出高的要求外，还增加了对设备通道固定时延温度系数 $< 1\sim 2 \text{ ps}/^\circ\text{C}$ 技术要求。为此，在前期技术与工程经验积累的基础上，又进行了技术攻关和思维创新，将每路测试信号在输入模拟部分和时间展宽电路模拟部分设计为成对的温度系数负相关电路，使温度变化对其时延影响能互相抵消，可达 90% 以上；并采用优良的导热性能材料进行一体化屏蔽盒设计，使整个测量板卡成为一个等温体，板卡正常工作时，可将不同通道间的温度差别减小到 1°C 以内。此外还采取测温、反馈算法补偿通道固定时延，不断迭代优化，最终实现了设备通道的固定时延温度系数 $< 1.0 \text{ ps}/^\circ\text{C}$ 。2018 年北斗导航定位系统地面控制系统的某发射天线机房采用了 24 块 7 通道的 MTIC 测量板卡，要求测量噪声 $< 20 \text{ ps (rms)}$ 、测量不确定度 $< 70 \text{ ps (max-100)}$ 、通道固定延迟不一致性 $< 50 \text{ ps}$ 、通道固定时延温度系数 $< 2 \text{ ps}/^\circ\text{C}$ 。某原子钟组的时差测量采用了 24 块 7 通道的 MTIC 测量板卡，要求测量噪声 $< 15 \text{ ps (rms)}$ 、测量不确定度 $< 20 \text{ ps (max-100)}$ 、通道固定延迟不一致性 $< 30 \text{ ps}$ 、通道固定时延温度系数 $< 1 \text{ ps}/^\circ\text{C}$ 。2018 年底，进行近 2 个月的验收测试，测试结果表明，国产皮秒级商用 MTIC 测量设备达到北斗导航定位系统工程化的性能要求。

5 国产 MTIM 测量仪与德国 TDC-GP21 芯片、SR620 的比测

2018 年某单位承担北斗导航定位系统地面控制系统的时间统一分系统研制建设，期间采购了 2 台国产 MTIM 测量仪，由 8 块 7 通道皮秒级商用 MTIC 测量板卡嵌装构成。指标要求 MTIC 的测量噪声 $< 15 \text{ ps (rms)}$ 、测量不确定度 $< 30 \text{ ps (max 100)}$ 、通道固定延迟不一致性 $< 30 \text{ ps}$ 。2019 年 4 月在该单位进行

了现场验收测量，测量结果表明，国产商用 MTIC 测量板卡及其测量仪整机达到合同规定的指标要求。

为验证国产测量仪的整机性能，验收测试期间，将 MTIM-712 测量仪与 1 台 SR620 测量仪以及 1 台利用德国 ACAM 公司 TDC-GP21 芯片构建的 TI 测量仪(本文称为 TDC-GP21 测量仪)同时比测。TDC-GP21 芯片采用延迟线技术，能实现 2 通道高精度 TI 测量，其测量分辨力为 10 ps、测量噪声为 30 ps、测量不确定度为 100 ps。比对测量场景见图 8 所示，使用受控频偏时间间隔连续检测方法测量产品不确定性能，它们的相位曲线见图 9 所示，测量数据统计结果比较见表 2 所示。



图 8 3 台 TI 测量仪比对测量

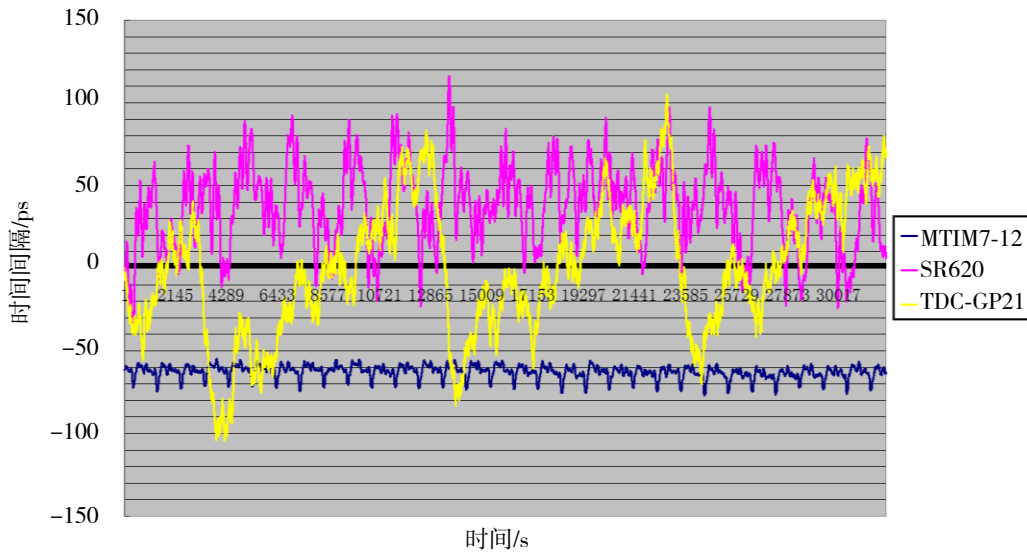


图 9 受控频偏 (10^{-11}) 时间间隔连续检测方法相位曲线

表 2 3 台 TI 测量仪的测量结果比较

设备名称	测试方法概要描述	TDC-GP21 测量仪	MTIM-712 测量仪	SR620 测量仪
不确定度 (MAX-100)	受控频偏 (10^{-11}) 时间间隔连续检测方法的 9 h 测量	92 ps	9 ps	71 ps
噪声 (RMS)	设备加电 1 h 恒温后，参考和被 测信号间均同源的 300 s TI 测量	58 ps	9 ps	21 ps
温度系数 ps/°C	设备加电 30 min 内，参考和被测信号间均同 源情况下的时间间隔变化与温度变化的比值	3.6 ps/°C	0.6 ps/°C	5.0 ps/°C

6 国产 MTIM 测量仪与进口同类产品手册指标比较

多年来工程应用表明, 国产商用皮秒级 MTIM 测量仪的产品质量和服务品质得到广泛认可, 其性能与进口名牌同类产品相当, 参见表 3, 可以满足国产化工程应用要求, 替代进口同类产品, 为我国工程化核心设备实现全面自主可控打下了良好的基础。

表 3 皮秒级商用 MTIM 测量仪与进口同类产品比较【手册指标】

型号	生产厂商	分辨率/ps	测量范围	噪声 (RMS) /ps	不确定度 (MAX-100) /ps	最高采样率	温度特性/ps/°C	路数
SR620	美国斯坦福大学	25	比相仪	50	500	1 ksps/ch	15	2
MCTIC	德国 TIME TECH	10	± 1 s	20	100	1 sps/ch	2.0	16
GP21 芯片	德国 ACAM	10	0~10 μ s	30	100	500 ksps/ch	10	2
MTIM-712C	北京一朴时频	10	± 42 s	15	20	500 ksps/ch	1.0	16

7 结语

目前, 国内部分厂家相继开展了皮秒级 TIM 的技术研究和设备开发, 但是能达到量产、作为工程化应用、测量不确定度能优于 100 ps 的 TI 测量仪仍为少见。伴随我国北斗卫星导航系统发展成长起来的国产商用皮秒级 MTIM 测量仪的技术和性能, 经不断改进完善, 已推向市场多年。据最近两年统计, 分别给部队、学校、地方科研院所和重点时间频率计量测试单位等提供了近 12 批次、整机 26 台、多通道 OEM 的 MTIC 测量板卡 123 块, 共计 1 009 个皮秒级 TI 测量通道。在多项工程应用交货验收过程中, 积累了在相同场合下与国外名牌厂商同档次 TI 测量仪进行比对测量的大量数据。数据表明: 国产商用 MTIM 测量仪不断改善了可靠性和稳定性、提升了性能, 为我国卫星导航系统等工程应用提供了可靠的支撑。

参考文献:

- [1] 陈向东, 郑瑞锋, 陈洪卿, 等. 北斗授时终端及其检测技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
- [2] 华宇, 郭伟, 燕保荣, 等. 我国授时服务体系发展现状分析[J]. 时间频率学报, 2016, 39(3): 193-201.
- [3] JJG 238-2018 时间间隔测量仪检定规整[S]. 2018.
- [4] SZPLET R, KALISZ J, SZYMANOWSKI R, et al. Interpolating time counter with 100 ps resolution on a single FPGA device[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2000, 49(4): 879-883.
- [5] MOTA M, CHRISTIANSEN J. A high-resolution time interpolator based on a delay locked loop and an RC delay line[J]. Solid-State Circuits, 1999, 34: 1360-1366.
- [6] WANG Y G, CAO Q, LIU C. A multi-chain merged tapped delay line for high precision time-to-digital converters in FPGAs[J]. IEEE Transactions on Circuits and systems-II: Express Briefs, 2018, 65(1): 96-100.

- [7] 张军, 姬晨. 皮秒时间间隔测量方法综述[C] // 2005 全国时间频率学术交流会论文集, 西安: 2005 全国时间频率学术交流会组委会, 2005.
- [8] 张延, 黄佩诚. 高精度时间间隔测量技术与方法[J]. 天文学进展, 2006, 24(1): 1-15.
- [9] 朱祥维, 孙广富, 雍少为, 等. 利用相位估计算法实现 ps 量级的高精度时间间隔测量[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(12): 2626-2631.
- [10] 卜朝晖, 黄佩诚, 朱人杰. 基于声表面波色散延迟线激励的高精度时间间隔测量方法的研究[J]. 天文学进展, 2012, 30(4): 527-540.
- [11] 孟令达, 施韶华, 赵志雄, 等. 多通道时间间隔测量分析系统的设计与实现[J]. 时间频率学报, 2017, 40(2): 80-86.
- [12] 李树洲, 史丰丰, 张小朋, 等. 皮秒级时间间隔测量精度检定方法的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(6): 521-527.
- [13] 陶惠钧. 原子钟的相对论效应探讨[C] // 2005 全国时间频率学术交流会论文集, 西安: 2005 全国时间频率学术交流会组委会, 2005.
- [14] 卫星导航定位科学技术奖奖励委员会. 卫星导航定位科学技术奖奖励公报[K]. 北京: 中国卫星导航定位协会, 2012: 5.
- [15] 张军, 史丰丰, 陈洪卿, 等. TDC 非线性度影响高精度时间间隔测量的分析研究[J]. 2017 全国时间频率学术会议论文集, 西安: 2017 全国时间频率学术会议组委会, 2017.
- [16] 张军, 王向磊, 王路生, 等. 国产小铯钟比测结果分析[J]. 时间频率学报, 2018, 41(3): 162-170.