

中国科学院物理研究所 M00组供稿  
北京凝聚态物理国家研究中心

第57期

2020年07月20日

## 国产新锁相的原理研究与技术开发取得重要进展

相位不仅是信息科学与工程中被广泛应用的基本参数，也是物质科学中影响深远的概念，可作为系统的整体状态演化的重要指示量，被杨振宁先生认为跟对称性与量子化并列属于20世纪物理学中的三大发展主旋律。相位锁定技术是1932年“相干通讯”的发明基础上演变而来，后来成为时间维度维持同步的重要“锁相环”方法。从时间维度同步拓展到信号强度维度，基于相敏检波将较高频率的交变幅度信号下变频到较低频率抑制了噪声的信号，形成在微弱信号测量中通常必不可少的锁相放大器。锁相放大器本质上是超窄带解调器，提取埋在噪音中哪怕是微弱到纳伏的交流信号的幅值和相位是其独特优势，具备极高的频域分辨能力，长期以来被广泛应用于物性测量、扫描探针显微镜、激光光谱、无损检测、基于波谱的医疗成像、地震测量等工业企业与科学研究领域，在新兴的行业应用场景中也能找到锁相放大器的身影，比如量子计算机、精密物联传感、高精度元件分级测试、三代生物基因测序、空间引力波探测等。从一定程度上讲，作为底层信号精密测量工具的锁相放大器，其应用程度体现着科研能力与工业化水平。

国家统计局数据显示，锁相放大器2018年国内市场销售额约10.7亿元人民币，其中85%以上从美国、瑞士和日本进口。1970年代开始中科院物理所与南京大学均有锁相放大器的研究与生产，然而，改革开放后相当长时间内在市场与技术迭代进程中遗憾未能获得跟国外经典锁相产品的竞争优势。近些年中山大学的国产锁相放大器性能跟进口主流品种相比已不逊色，在市场上受用户认可度也越来越高。然而国产锁相放大器的成长空间仍然很大，尤其在技术源头被国外“卡脖子”的风险依然很高。因而，通过锁相原理的创新来推动微弱信号测量技术进步，具有非常强的理论与现实意义。

中国科学院物理研究所/北京凝聚态物理国家研究中心磁学国家重点实验室公共技术组陆俊副主任工程师长期进行锁相放大器从原理到应用场景的研究，并积累产生了一系列的技术成果。早在十几年前，陆俊就开始研究锁相放大器，并开创性的采用虚拟仪器方法进行锁相放大器的原理和应用研究【Meas. Sci. Technol. 19 (2008) 045702】，通过Web of Science科学文献数据库以“Virtual lock in”作为标题关键词检索，结果显示该工作是精密锁相测量领域最早、也是最高被引文章。通过精密锁相算法原理改进及应用探索，陆俊在超宽频锁相、时间分辨锁相、脉冲锁相、锁相仪评估方法、以及锁相在精密阻抗与弱磁电测量等实际系统中的应用方面进行了系统的研发【CN102495280A(2014年授权)、CN102608425A(2015年授权)、CN103630148A(2016年授权)、CN104655929A(2017年授权)、CN104820145A(2018年授权)、CN105487027A(2018年授权)、CN107328993A(2020年授权)】。其间，曾与磁学实验室郝学奎副研究员合作将脉冲锁相用于快速磁致伸缩测量【Rev. Sci. Instr. 87 (2016) 043902】。

在锁相基本原理研究中，陆俊注意到传统方法测量结果是跟参考信号频率对应的复数，被测复数真实的交变频率是作为隐变量，通常被当作跟参考频率完全一致，但实际上被测信号的频率与参考信号的频率会在传输通道或系统应变过程中发生偏离，还有些信号比如被动观测的信号并不能预先可控，预设定频率与真实频率的不一致最终一定导致相位与幅度测量的不准确。解决这个问题的思路实际上是取消被测信号的频率与固定参考信号的频率一致的假定，通过锁相的算法改进成频率的泛函，同时解决被测信号的抗噪测频与准确锁相两个问题，新方法的名称叫测频锁相仪或锁相频率计。在这个思路指引下，陆俊逐步改进算法并在近两年产生突破，经过理论推导出单周期信号的锁相频谱在估计频点附近的局部函数形式并用三点拟合进行测频，避免经验抛物线函数的偏差问题，精度达到统计理论限值，而且相比快速傅里叶变换FFT测频复杂度跟取样长度N的关系由 $N \cdot \log(N)$ 倍降为N倍依赖，基于此使用较少的运算量就能达到精确测频与锁相的结果。通过原理仿真，陆俊发现锁相频率计的测量不确定度除了存在理论下限Cramers-Raw Lower Bound外，还因为锁相自身有限的取样窗口而存在锁相测频不确定度上限Lock-in Upper Bound，从而定量给出锁相放大器正常工作理论最低可测信噪比的关系式。

测频新锁相算法同时解决了通常频率计不能对低信噪比信号进行测量与锁相必须预设参比频率的问题，由于减少了预设参数，很容易就给锁相放大器提高智能化水平，通过增加“傻瓜”功能，让国产新锁相能够跟万用表一样便于被用户使用。设计好测频新锁相算法后，陆俊通过协作企业研创达公司实现了从电路设计、FPGA编程、ARM嵌入式与上位机跨平台方案，最终融合模拟与数字电路技术形成国产新锁相样机。新锁相在1秒积分时间1 kHz频点测量的底噪是1nV/√Hz；测频精度在10 kHz处能达到1 ppb(十亿分之一)。通过信号与不同类型噪音预混合与提取的系统测试，结果显示噪音下测频精度接近理论限值。

相关研究成果发表在近期的《科学仪器评论》杂志上【Review of Scientific Instruments 91 (2020) 075106】；关于锁相涉及到的基本数学与物理科普知识，陆俊也专门撰文介绍复数及复数测量中的学问，并发表在《物理》杂志上。本工作先后获得过国家自然科学基金(批准号：51327806)、中国科学院青年创新促进会(批准号：2018009)、中国科学院海西创新研究院自主部署项目(批准号：FJCXY18040302)以及物理所自主仪器研制项目资助。

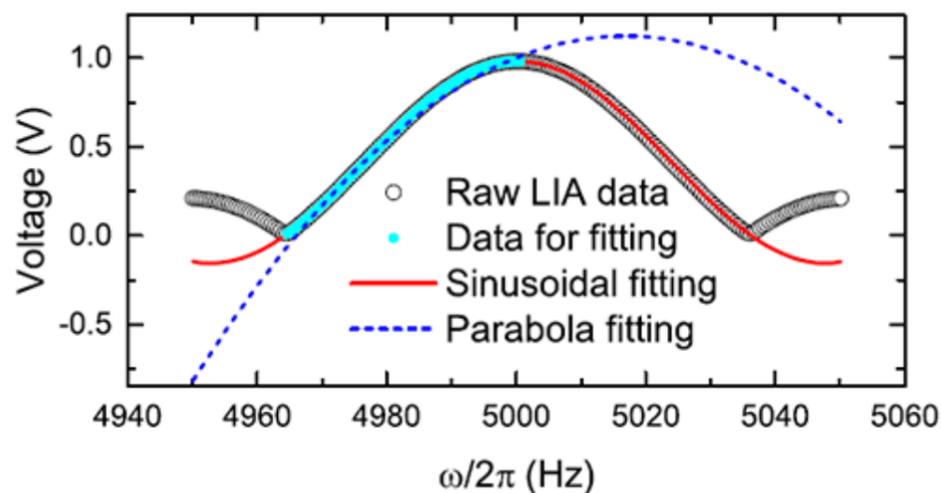


图1. 锁相频率计的拟合算法与常用的抛物线近似拟合结果比较。

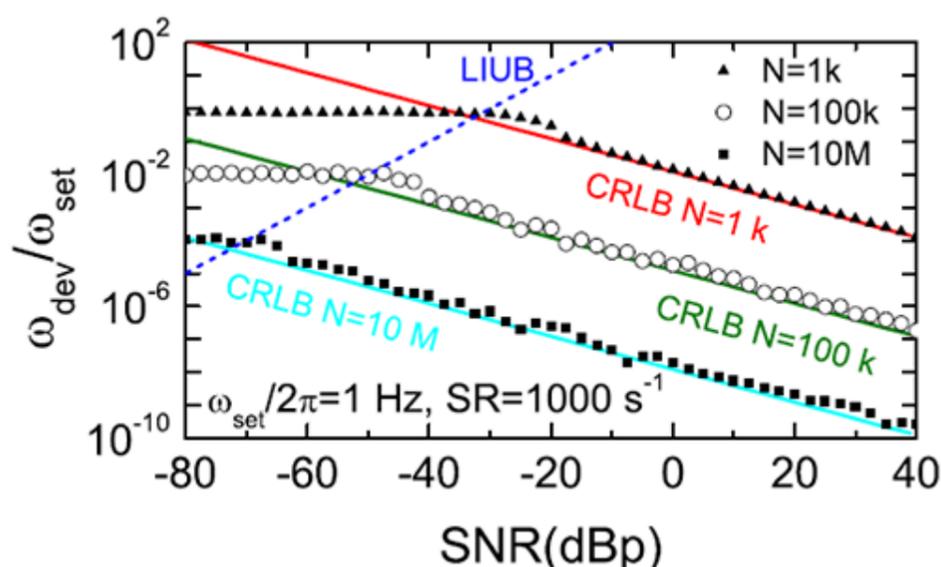


图2. 不同信噪比下使用锁相频率计算法的测量精度仿真结果。

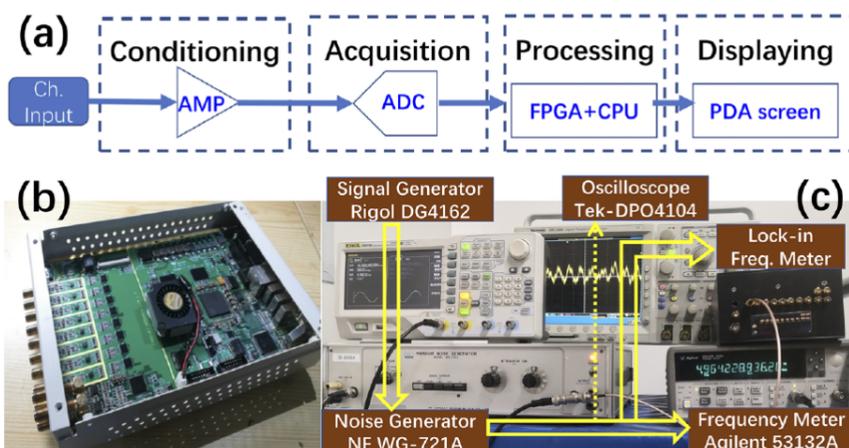


图3. 新型测频锁相仪的结构原理图与测试场景图。

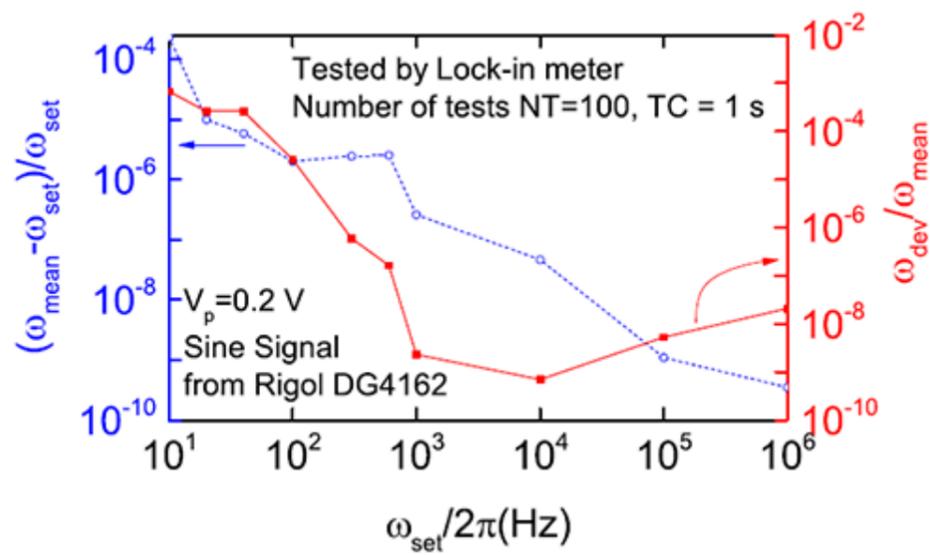


图4. 新型测频锁相仪的测频精度与准确度随信号频率变化的曲线图。

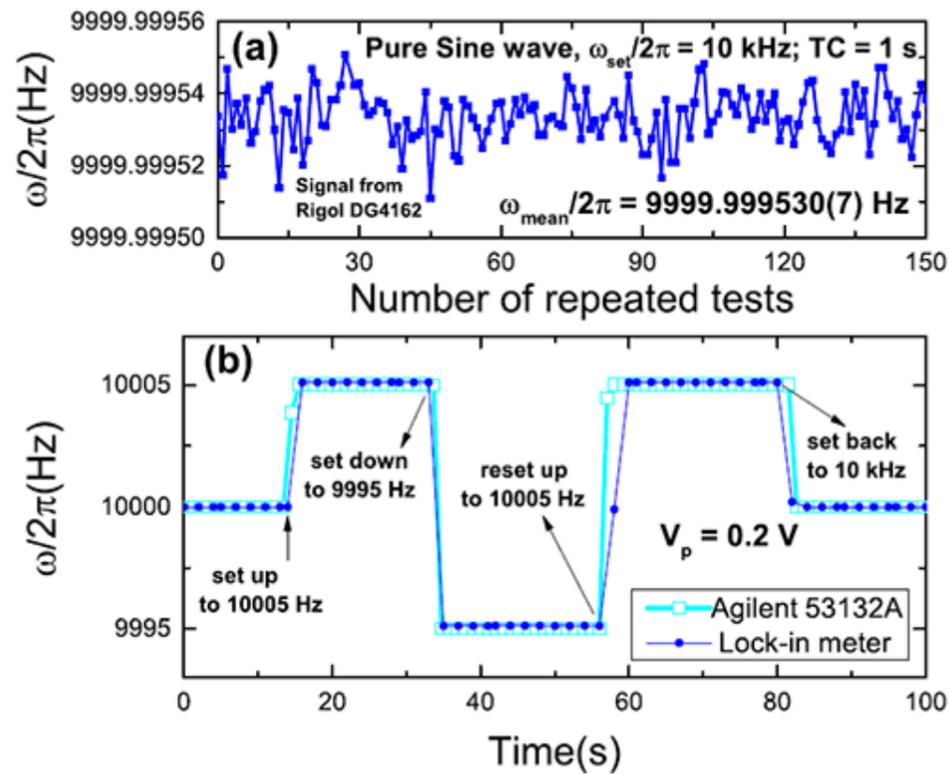


图5. 新型测频锁相仪的测频精度及准确度随时间变化曲线图，其中(a)定频10kHz，(b)调节频率跟踪测量结果。

[1-Rev. Sci. Instrum. 91, 075106 \(2020\).pdf](#)

[2-SimLIF2020\\_LabviewSourcePackage.zip](#)

[3-复数与复数测量《物理》2020-49-7-013.pdf](#)

[公开课](#)
[微信](#)
[联系我们](#)
[友情链接](#)
[所长信箱](#)
[违纪违法举报](#)

