

推荐国家科技进步奖项目公示

项目名称	超高精度时间频率同步及应用
推荐单位	中国计量测试学会
推荐单位意见： 该项目研究的超高精度时间频率传输与同步技术，可以实现异地时间频率信号的高精度传输与同步。项目技术先进，应用性强，在我国国防、航天、通信、电力、计量、天文、科研等领域均具有重要应用价值。 项目发明了光纤链路传输信号相位起伏的实时测量和动态补偿技术、环外器件的噪声探测与抑制技术、任意位置下载技术和补偿系统后置的参考频率分发技术。解决了外界环境扰动情况和频率传输系统中信号单次通过路径部分易受外界环境影响下，传输信号稳定度恶化的难题。同时，极大的简化信号发射站点的功能和设备要求，解决了传统高精度时间频率传输技术信号发射、链路时延测量、时延补偿全部依赖发射站点的问题。 项目还首次提出并演示了基于高精度频率传输的相位噪声优化技术、自由空间高精度频率传输技术。创造性地将变带宽锁定滤波技术与主动补偿稳相传输技术相结合，在接收端复现了与氢钟频率稳定度一致且高频域相位噪声优于氢钟的高稳定度信号，并在光纤时间频率补偿技术的基础上，首次提出并实现了自由空间高精度频率传输技术。 该项目获授权发明专利 5 项，发表 SCI/EI 论文 16 篇。研究成果为 2015 年中国计量测试学会科技进步一等奖。质检总局组织的专家鉴定，认为该项目成果“瞄准国家重大需求，实现了微波频率信号的高稳定度传输，具有很高的实际应用价值。可应用于分布式守时体系、时频系统的统一、甚长基线射电天文观测及卫星定位观测等领域。系统技术方案先进，创新性强，整体性能指标达到国际领先水平。” 推荐该项目为国家科学技术进步奖一等奖。	

项目简介：

项目属于测试计量仪器学科领域，主要针对高精度时间频率信号的高精度分发与同步问题开展研究。准确、稳定、统一、同步的时间频率体系在国防、航天、通信、电力、计量与标准化、天文、科技等关键领域都有重要作用，其安全可靠关系到我国国防安全和国民经济的核心利益。

在国家 973、重大科学仪器设备开发专项的支持下，本项目通过系统性研究，形成了解决复杂拓扑网络，外界噪声干扰环境下，可支持三维覆盖的高精度时间频率分发技术，并在实际多系统中成功应用，解决了我国相关领域的重大技术问题。主要创新如下：

1) 发明了光纤链路传输信号相位起伏的实时测量和动态补偿技术，解决了外界环境扰动情况下，传输信号稳定度恶化的难题。基于往返信号相位探测的方法，实现了对信号传输链路时延起伏的实时高精度监测。

2) 给出了环内与环外器件噪声来源与补偿机理的理论分析，发明了环外器件的噪声探测与抑制技术，解决了频率传输系统中信号单次通过路径部分易受外界环境影响，导致传输稳定度恶化的难题。提出了光纤器件噪声附加探测，以及微波系统自动温度补偿技术。

3) 针对复杂拓扑模式下的光纤网络传输需求，发明了任意位置下载技术和补偿系统后置的参考频率分发技术。该发明可以极大的简化信号发射站点的功能和设备要求，解决了传统高精度时间频率传输技术信号发射，链路时延测量，时延补偿全部依赖发射站点的问题。

4) 首次提出并演示了基于高精度频率传输的相位噪声优化技术。创造性地将变带宽锁定滤波技术与主动补偿稳相传输技术相结合，在接收端复现了与氢钟频率稳定度一致且高频域相位噪声优于氢钟的高稳定度信号。

5) 首次提出并演示了自由空间高精度频率传输技术。自由空间中频率信号的传输与同步在全球卫星导航系统(北斗系统)和射电天文学等领域具有重要意义。项目组在光纤时间频率补偿技术的基础上首次提出并实验演示了自由空间高精度频率传输技术。

项目执行期间共发表 SCI 论文 13 篇（2 篇发表于 Nature 系列子刊 ScientificReports），EI 论文 3 篇，申请国家技术发明专利 7 项，授权 5 项。

项目部分研究成果在 2015 年获得中国计量测试学会科技进步一等奖。项目成果已成功应用于我国国内北京地区时间频率网络，北斗卫星导航地面守时系统，航天器轨道测控，并通过激烈竞选成功入选为国际大科学工程平方公里阵列射电望远镜的参考频率分发与同步首选方案。由质检总局组织的验收鉴定意见指出：“系统瞄准国家重大需求，实现了微波频率信号的高稳定度传输，具有很高的实际应用价值。可应用于分布式守时体系、时频系统的统一、甚长基线射电天文观测及卫星定位观测等领域。系统技术方案先进，创新性强，整体性能指标达到国际领先水平。”

客观评价:

1. 技术检测报告

项目研制的“原子时信号光纤传输演示系统”与实验室样机,通过2011年国家质检总局组织测试(详见附件评价证明1),测试结论:

■ 原子时信号光纤传输演示系统在清华大学至中国计量科学研究院昌平园区往返约80公里的城市光纤链路上传输9.1GHz微波频率信号的传输稳定度达到:
 $1\text{s}: 7 \times 10^{-15}$; $10\text{s}: 1.5 \times 10^{-15}$; $10^2\text{s}: 3 \times 10^{-16}$; $10^3\text{s}: 4 \times 10^{-17}$; $10^4\text{s}: 4 \times 10^{-18}$;

■ 原子时信号光纤传输系统样机在50公里实验室内光纤链路的传输稳定度达到:

$1\text{s}: 2 \times 10^{-15}$; $10\text{s}: 1 \times 10^{-15}$; $10^2\text{s}: 5 \times 10^{-16}$; $10^3\text{s}: 7 \times 10^{-17}$; $10^4\text{s}: 6 \times 10^{-18}$;

2. 科技查新报告

项目研究内容“微波原子时信号的精密传输与同步”,2011年12月委托国家图书馆科技查新中心进行科技查新(详见附件评价证明2),报告结论:

本查新项目“微波原子时信号的精密传输与同步”的创新点为:通过在发射端对发射频率信号相位噪声进行主动补偿的方法,微波原子时信号光纤传输系统的传输稳定度指标为 $7.0 \times 10^{-15}/\text{s}$, $4.5 \times 10^{-19}/10^5\text{s}$ 。这一指标是同类方法中,国际最好指标。

综上所述,在本查新检索涉及的国内外公开文献范围内,未见与本查新项目上述查新点内容相同的报道。

3. 鉴定意见

2011年,国家质量监督检验检疫总局科技司在北京主持召开了“原子时信号的精密传输与同步”项目成果鉴定会(详见附件评价证明3)。鉴定委员会审查了项目组提交的技术材料,听取了项目技术研究报告、查新报告、测试报告,并现场考察了NIM-THU微波原子时信号光纤传输演示系统和样机。经质询讨论,形成鉴定意见如下:

一. 项目组提供的技术资料齐全、完整,实施方案合理,达到了项目合同规定的各项指标。

二. 项目自主研制了用于传输微波频率信号的“NIM-THU原子时信号光纤传输系统”。该系统在清华大学至中国计量科学研究院昌平园区往返约80公里的城市光纤链路上传输9.1GHz微波频率信号,连续运行一周的测试表明,稳定度达到 $7 \times 10^{-15}/\text{s}$, $4 \times 10^{-18}/10^4\text{s}$ 。

三. 项目主要创新点为:

1. 提出了在发射端探测并且主动补偿光纤传输链路总体相位噪声的技术方法。通过对双次及单次传输链路相位噪声的同时补偿,实现了微波频率信号的高稳定度传输;

2. 采用环路反馈控制技术,补偿了主体传输路径上的长度与相位涨落误差;

3. 采用环外器件精确控温技术,有效减弱了环外器件与传输路径环境变化引起的相位抖动;

4. 提出了在传输链路中任意位置提取高稳定度微波频率信号的方法,并进行

了该方法的可行性验证,实现了整条链路全程适用、可多处下载的时间频率传输网络。

鉴定委员会认为:“NIM-THU 原子时信号光纤传输系统”,瞄准国家重大需求,实现了微波频率信号的高稳定度传输,具有很高的实际应用价值。可应用于分布式守时体系、时频系统的统一、甚长基线射电天文观测及卫星定位观测等领域。系统技术方案先进,创新性强,整体性能指标达到国际领先水平。

4. 重要科技奖励

研究成果“超高精度时间频率传输与同步”2015 年获得中国计量测试学会科技进步一等奖。(详见附件评价证明 4)

5. 同行学术评价

国内 3 位教授、3 篇论文对项目组工作给予了高度评价。

(1) 北京大学信息科学技术学院赵建业教授在其发表在期刊《Scientific Reports》(Nature 子刊)上的论文“High-precision distribution of highly stable optical pulse trains with 8.8×10^{-19} instability”中认为:项目组实现的基于光纤传输的射频信号分发与同步技术,传输稳定度 10^{-19} /天,达到国际领先水平(英文原文详见附件论文 17)。

(2) 北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室徐坤教授在其发表在期刊《Optics Letters》上的论文“Stable radio frequency phase delivery by rapid and endless post error cancellation”中认为:项目组提出的基于光纤的频率信号传输与同步技术中,采用高性能压控振荡器,实现了较高的短期稳定度,同时具有较大的补偿范围(英文原文详见附件论文 18)。

(3) 中国科学院上海光学精密机械研究所蔡海文研究员在其发表在期刊《IEEE Photonics Journal》上的论文“Joint time and frequency dissemination network over delay-stabilized fiber optic links”中认为:项目组提出的基于光纤链路频率同步的任意点位置频率信号下载技术,可实现线性拓扑网络结构中主干光纤链路的多点频率信号下载,从而进一步扩大其实际应用范围(英文原文详见附件论文 19)。

推广应用情况：

项目共申请国家技术发明专利 7 项，授权 5 项。发表 SCI 论文 13 篇，EI 论文 3 篇，这些知识产权为高精度时间频率同步技术的应用提供了理论支撑。已在中国人民解放军标准时间频率中心、国家遥感中心、航天测控任务、中国计量科学研究院原子钟比对项目中得到广泛应用。

主要应用单位情况

应用单位名称	应用技术	应用时间	应用单位联系人及电话	经济、社会效益
中国人民解放军标准时间频率中心	1, 2, 4	2015. 03-至今	蔡志武 13810477881	对北斗卫星导航系统地面时间提供高精度参考和备份
国家遥感中心	2, 3, 4	2013. 06-至今	景贵飞 13910715768	为国际大科学工程 SKA 提供参考频率分发与同步系统
中国人民解放军 63778 部队	1, 2, 4	2014. 08-2015. 05	余烨 18804540026	提高我国深空站时频同步系统精度
北京跟踪与通信技术研究所	1, 2, 4	2014. 08-2015. 05	陈少伍 13641358854	提高我国深空站时频同步系统精度，完成对我国某航天器跟踪任务
中国计量科学研究院	1, 2, 3, 4	2013. 11-2014. 06	方占军 13717518662	实现氢原子钟与光频原子钟的高精度比对

主要知识产权证明目录:

1. 发明专利: 原子时信号接收系统及方法 (ZL201110270288.0), 授权日期: 2013 年 11 月 20 日, 权利人: 清华大学, 发明人: 王力军, 王波, 高超, 苗菁。
2. 发明专利: 一种微波频率信号被动传输系统及方法 (ZL201310449436.4), 授权日期: 2016 年 2 月 17 日, 权利人: 清华大学, 发明人: 王力军, 王波, 白钰, 高超。
3. 发明专利: 一种基于频率同步的微波测距及时间同步系统及方法 (ZL201310683870.9), 授权日期: 2016 年 8 月 17 日, 权利人: 清华大学, 发明人: 王力军, 王波, 白钰, 高超, 苗菁, 朱玺。
4. 发明专利: 原子时信号传输系统及传输方法 (ZL201110186493.9), 授权日期: 2013 年 10 月 30 日, 权利人: 清华大学, 发明人: 王力军, 李天初, 王波, 高超。
5. 发明专利: 一种基于相位补偿的自由空间频率信号传输系统 (ZL201310467522.8), 授权日期: 2016 年 11 月 2 日, 权利人: 清华大学, 发明人: 王力军, 王波, 苗菁, 白钰, 高超, 朱玺。

主要完成人情况：（摘自“主要完成人情况表”中的部分内容，公示姓名、排名、行政职务、技术职称、工作单位、完成单位、对本项目技术创造性贡献）

1. 王力军，行政职务：无，技术职称：教授，工作单位：清华大学，完成单位：清华大学，对本项目技术创造性贡献：对创新点 1、2、3、4、5 做出了贡献。提出利用主动相位补偿方法传输频率的方法；提出利用时延实时测量和补偿稳定传输是标的方法；提出基于高精度时频同步的新型时频同步网络思想；提出基于广域路基时频同步网络的广域路基定位导航授时网络概念；提出一点至多点传输的 $1f-2f$ 方法。组织实施整体项目。作为中国计量科学研究院首席科学家（兼），促进清华大学与中国计量科学研究院开展联合研究，并实现相关技术在氢原子钟与光频原子钟异地比对项目中的重要应用（详见附件应用证明 5）

2. 王波，行政职务：无，技术职称：副教授，工作单位：清华大学，完成单位：清华大学，对本项目技术创造性贡献：对创新点 1、2、3、4、5 做出了贡献。提出利用主动相位补偿方法传输频率的方法；提出基于光纤的可多点下载频率传输方法；提出适用于网络拓扑结构的一点对多点频率传输方法；提出基于鉴相和测频的超高精度光纤传输时延测量方法；具体负责超高精度时频同步关键技术研发并拓展其在深空、射电天文、通信等领域的应用。

3. 高超，行政职务：无，技术职称：助理研究员，工作单位：清华大学，完成单位：清华大学，对本项目技术创造性贡献：对创新点 1、2、3、4 做出了贡献。实验实现基于光纤的可多点下载频率传输系统；实验实现北京区域时频同步网络；作为技术骨干，参与所有拓展应用的实验验证过程。

4. 白钰，行政职务：无，技术职称：助理研究员，工作单位：清华大学，完成单位：清华大学，对本项目技术创造性贡献：对创新点 3、4、5 做出了贡献。实验实现基于光纤的可多点下载频率传输系统；实验实现北京区域时频同步网络；参与航天器测控实验；作为技术骨干，参与所有拓展应用的实验验证过程。

5. 张建伟，行政职务：无，技术职称：助理研究员，工作单位：清华大学，完成单位：清华大学，对本项目技术创造性贡献：对创新点 1 做出了贡献。利用光纤时频传输与同步技术实现镱离子微波钟与国家频率基准的比对。

6. 冯焱颖，行政职务：无，技术职称：副教授，工作单位：清华大学，完成单位：清华大学，对本项目技术创造性贡献：对创新点 1 做出了贡献。论证高精度时频同步技术对于高精度定位导航授时系统的关键作用。

7. 苗菁，行政职务：无，技术职称：工程师，工作单位：中国电子科技集团公司第十四研究所，完成单位：清华大学，对本项目技术创造性贡献：对创新点 4、5 做出了贡献。参与北京区域时频同步网络建设，参与实现中国计量院昌平园区至和平里园区，以及北京卫星导航中心的频率传输。

8. 朱玺，行政职务：无，技术职称：工程师，工作单位：北京无线电计量测试研究所，完成单位：清华大学，对本项目技术创造性贡献：对创新点 3、4 做出了贡献。实验实现适用于 SKA 的一点对多点复杂拓扑结构的频率传输系统。

9. 董婧雯，行政职务：无，技术职称：无，工作单位：清华大学，完成单位：清华大学，对本项目技术创造性贡献：对创新点 3、4 做出了贡献。优化基于鉴相和测频的超高精度多通道光纤传输时延测量技术。

10. 袁一博，行政职务：无，技术职称：无，工作单位：清华大学，完成单位：清华

大学，对本项目技术创造性贡献：对创新点 3、5 做出了贡献。实验实现可多点下载的时标传输系统；参与在南非开展的 SKA 参考频率传输与同步系统测试工作。

主要完成单位及创新推广贡献：

1. 清华大学

对创新点 1、2、3、4、5 做出了贡献。清华大学是本项目的主要完成单位，项目依托单位。通过系统性研究，形成了解决复杂拓扑网络，外界噪声干扰环境下，可支持三维覆盖的高精度时间频率分发技术，解决了我国相关领域的重大技术问题。联合中国人民解放军标准时间频率中心、国家遥感中心、航天测控站、中国计量科学研究院等多家单位，成功完成了高精度时间频率同步技术在众多领域的演示应用。

2. 中国计量科学研究院

对创新点 1、3、5 做出了贡献。中国计量科学研究院是本项目的合作完成单位。与清华大学合作开展了原子时信号的精密传输与同步研究工作。是“NIM-THU 原子时信号光纤传输系统”科技成果的共同完成单位。作为国家最高的时间频率计量科学研究中心，为本项目的顺利开展提供了高质量时间频率基标准资源的支持与保障。

完成人合作关系说明：

本项目所有完成人员（王力军、王波、高超、白钰、张建伟、冯焱颖、苗菁、朱玺、董婧雯、袁一博）在本项目执行时期，均工作于完成单位清华大学，完成人合作形式包括论文及专利合著。

序号	合作方式	合作者 (项目排名)	合作时间	合作成果	证明材料	备注
1	共同知识产权	王力军 ¹ 、王波 ² 、高超 ³ 、白钰 ⁴ 、苗菁 ⁷ 、朱玺 ⁸	2010.9-2014.1	发明专利 3 项	附件专利 1-3	
2	论文合著	王力军 ¹ 、王波 ² 、高超 ³ 、白钰 ⁴ 、张建伟 ⁵ 、冯焱颖 ⁶ 、苗菁 ⁷ 、朱玺 ⁸ 、董婧雯 ⁹ 、袁一博 ¹⁰	2010.9-2014.1	合作发表论文若 16 篇	附件论文 1-16	