

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461.2024.01.008

10 MHz 氢钟信号传递系统

蔡桢荻^{1,2}, 孙焕尧¹, 陈群峰^{1*}

(1 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 湖北 武汉 430071;
2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为满足同一科研园区内不同建筑之间 10 MHz 氢钟信号 (HCS) 长期稳定度共享的需求, 提出了一种低成本、集成化的基于光纤链路的 10 MHz HCS 传递完整解决方案。该方案采用 1 GHz 的射频信号对激光光强进行调制, 利用光纤实现信号传递。通过将远端反射信号与本地信号和频后直接与待传递的 HCS 分频鉴相, 输出误差信号反馈控制 1 GHz 信号的频率, 实现远端 1 GHz 信号与本地 HCS 之间的相位锁定, 从而使远端 1 GHz 信号具有与本地 HCS 相同的频率稳定度; 之后再通过分频器在远端生成 10 MHz 信号, 作为射频参考输出。实验验证了该方案的频率传递保真度, 该系统在 200 m 往返光纤上的附加频率稳定度 (艾伦偏差) 为 1 s 平均时间 2.4×10^{-13} 和 10000 s 平均时间 5.7×10^{-17} ; 在 20 km 传递距离上, 附加频率稳定度 (艾伦偏差) 为 1 s 平均时间 4.8×10^{-13} 和 10000 s 平均时间 2.1×10^{-16} 。研究结果表明该系统的长时间频率传递稳定度优于 HCS 的频率稳定度, 可以满足千米范围内氢钟信号共享的需求。

关键词: 光通信; 氢钟信号传递; 光纤; 锁相环; 噪声补偿

中图分类号: TM935 文献标识码: A 文章编号: 1007-5461(2024)01-00087-08

A 10 MHz hydrogen clock signal transferring system

CAI Zhendi^{1,2}, SUN Huanyao¹, CHEN Qunfeng^{1*}

(1 Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;
2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to meet the long-term frequency stability sharing requirement of 10 MHz hydrogen clock signal (HCS) between different buildings in the same scientific research park, a low-cost and highly integrated solution for optical-fiber-based 10 MHz HCS transferring setup is proposed. In the scheme, a 1 GHz radio-frequency signal (1GRFS) is used to modulate the laser intensity and optical fibers are used for signal transmission. In principle, the sum of the source 1GRFS and signal reflected from remote is frequency-divided firstly and then phase-compared with the HCS to be transferred. Then the error signal from the phase comparator is fed back to modulate the frequency of the 1 GHz oscillator to lock the phase between the remote 1GRFS and the HCS. Therefore, the remote 1GRFS has the same frequency stability

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFA0304403, 2020YFA0309801), 中国科学院战略性先导科技专项 (B类) (XDB21010300, XDB21030100), 国家自然科学基金重大研究计划 (91636110, U1738141)

作者简介: 蔡桢荻 (1996 -), 女, 湖北武汉人, 研究生, 主要从事锁相相关电路的研究。E-mail: caizhendi@apm.ac.cn

导师简介: 陈群峰 (1981 -), 广东饶平人, 博士, 正高级工程师, 博士生导师, 主要从事超稳激光方面的研究。E-mail: qfchen@apm.ac.cn

收稿日期: 2022-03-31; **修改日期:** 2022-04-26

*通信作者。

as the HCS. Afterwards, a 10 MHz signal is generated at the remote site through a frequency divider as RF reference output. Furthermore, experiments are carried out to verify the precision of the system. It is shown that the additional frequency stability of the HCS transferring system is 2.4×10^{-13} at 1 s average time and 5.7×10^{-17} at 10000 s average time with a fiber link of 200 m, 4.8×10^{-13} at 1 s average time and 2.1×10^{-16} at 10000 s average time with a fiber link of 20 km. The verification results prove that the long-term stability of the transferring system is better than the frequency stability of the HCS, indicating that the system can be used for sharing HCS within kilometer range.

Key words: optical communication; hydrogen clock signal transferring; optical fiber; phase-locked loop; noise compensation

0 引言

当代正处于高速信息时代,对信息传递和处理的要求越来越高,对时间和频率参考精度也有更高的要求。高精度的频率基准在精密测量技术中发挥着重要作用,时间作为七个国际基本单位制之一,是目前测量精度最高的一个,这主要得益于用原子钟作频率测量基准。在精密测量实验中,通常选用低相位噪声、高频率稳定度的氢钟信号(HCS)频率作为守时频率参考^[1]。当前主动型氢钟(以Microsemi公司的MHM-2020为例)频率稳定度在1 s平均时间接近 1.5×10^{-13} ,10000 s平均时间稳定度可达到 1.5×10^{-15} ^[2]。由于氢钟价格昂贵且对运行环境要求高,通常是多个实验室共享一台氢钟。在一些精密物理实验中,要求异地两个系统的频率参考具有一定的相位关联,因此不可避免地需要将频率基准信号相干地传递到远端。传统手段利用同轴电缆进行传递,传递过程中由于外界干扰,相位噪声及频率稳定度明显恶化^[3],并且同轴电缆损耗高,在长距离传递时,信号幅度衰减大,信号信噪比严重下降,导致传递信号的稳定度恶化,达不到精密测量的要求。而光纤具有损耗低,抗干扰性强的优势,利用光纤链路可以实现更高精度的频率传递^[4]。

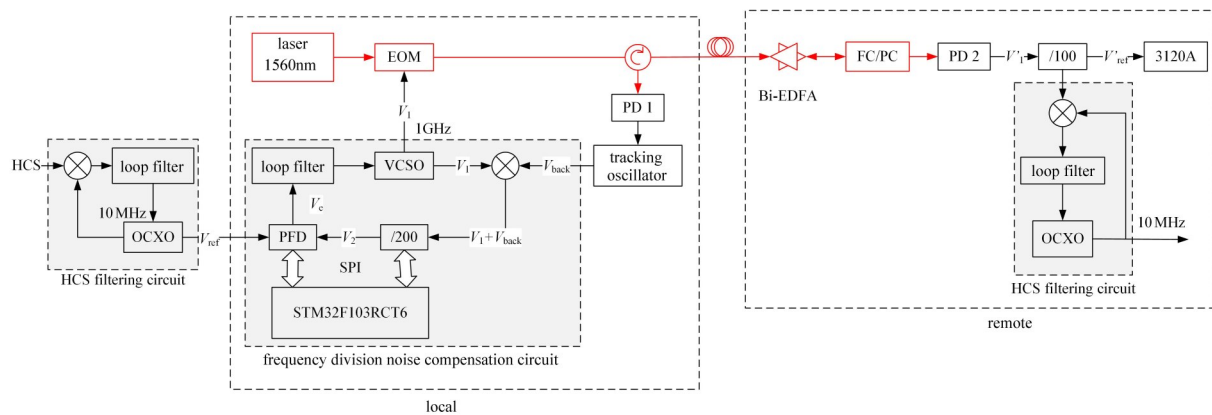
光纤频率传递方案可分为光频传递^[5-7]和光载射频传递^[8-15]。目前的原子频标基准仍然定义在射频频段,光载射频传递方案具有更高的现实需求。该方案将射频频率信号调制到激光光强上,通过光纤链路传递至远端,之后光电探测器在远端直接探测激光的光强变化并重建射频信号。相比于需要借助光学频率梳的光频传递方案,光载射频传递结构简单,具有更广泛的应用场景。利用光纤链路进行远距离传递时,外界机械振动、温度变化等会明显增大信号的相位噪声,降低传递信号的频率稳定度,因而需要对链路的相位噪声进行补偿以保持信号的频率稳定度。噪声补偿分为光学相位补偿和射频相位补偿两种,国内的多家科研机构在实验上验证了100 km左右的城市(际)光纤引入的噪声导致的频率稳定度抖动在10000 s到1 d平均时间可以抑制到 $10^{-17} \sim 10^{-19}$ ^[10-15]。

在频率传递的各种方案中,高频传递方案的研究十分广泛^[10-13],高频传递方案采用高精度的信号源产生~10 GHz的射频信号进行传递。之前的传递工作主要研究传递链路的稳定度保持,而较少涉及10 MHz到射频传递频率的传递精度问题。由于目前多数射频设备和仪器的同步频率在10 MHz,且低相噪的10 GHz信号源价格昂贵,体积较大,不利于系统的集成化、小型化和工程化。本文提出一种低成本的10 MHz端对端的频率传递完整实现方案。该方案利用分频锁相技术将10 MHz提高到1 GHz,通过光纤链路传递至远端,

在远端探测 1 GHz 的信号并通过分频重新生成 10 MHz。为了实现更好的系统集成, 本文采用单块尺寸为 160 mm × 100 mm 的电路板实现 10 MHz 参考频率对 1 GHz 传递信号的直接噪声补偿。本文分别在 200 m 往返光纤和 20 km 卷轴光纤上验证了高稳定度的射频参考传递。相比于之前的射频传递实验, 本系统结构简单、成本低, 是一种适用于同一科研园区内不同建筑之间的 HCS 共享实用方案。

1 实验方案与装置

本方案采用 1 GHz 信号进行传递以减小射频信号在传递过程中受到的干扰。本地端高速光电探测器 (PD) 探测从远端反射回的信号, 分频后与待传递的 HCS 进行相位比较以提取光纤链路引入的相位噪声, 通过反馈控制 1 GHz 信号的频率使其相位锁定到输入的待传递射频参考信号上实现光纤的噪声补偿。传递系统的结构如图 1 所示。



HCS: hydrogen clock signal; OCO: oven-controlled crystal oscillator; PFD: phase frequency detector; EOM: electro-optic modulator;

VCSO: voltage-controlled SAW oscillator; PD: photodetector; Bi-EDFA: bidirectional erbium-doped fiber amplifier

图 1 HCS 传递系统结构图

Fig. 1 HCS transferring system structure diagram

分频相位噪声补偿电路实现高频传递信号与待传递频率参考的相位锁定, 以补偿光纤的相位噪声, 是系统的核心。为了提高整个传递系统的频率稳定度, 电路中各项元器件尽量选择低温漂型号, 布局上考虑各功能模块之间的隔离以减小串扰^[16]。分频相位噪声补偿电路采用低噪声、高控制灵敏度的 1 GHz 表面声波压控晶体振荡器 (VCSO) 产生传递需要的射频信号。该振荡器的相位噪声典型指标为 -110 dBc/Hz@1 kHz 和 -139 dBc/Hz@10kHz。分频器和鉴频鉴相器 (PFD) 选择 Hittite 公司的超低噪声频率综合套片 HMC983 (噪声指标: -160 dBc/Hz) 和 HMC984 (整数模式噪声指标: -231 dBc/Hz), 分频数 N 和鉴相器电荷泵设置均可使用单片机编程控制, 方便调整分频数与环路增益。环路滤波选择有源比例积分滤波电路, 通过调整环路带宽来增大低频增益, 达到更好的噪声补偿效果。同时在电路设计中, 对温度敏感的元器件, 如鉴频鉴相器, 外加了控温模块保证其鉴相性能。分频相位噪声补偿电路中, VCSO 的输出被分成两路: 其中一路用于对激光的光强进行调制, 以产生传递信号; 另一路用作本振, 与远端反射回的调制信号混频, 经过高通滤波器提取和频项, 然后经分频器输出射频信号与待传递参考信号进行鉴频鉴相。鉴频鉴相输出通过正比积分环路滤波之后反馈控制 VCSO 的频率, 实现光纤链路相位噪声的补偿。整个分频相位噪声补偿电路的尺寸为 160 mm × 100 mm, 包括二次电源, 带有 DIN 41612 连接器, 符合 3U 机箱插件电路板的标准, 方便实现一个氢钟源到多

个需求终端传递信号的扩展。在进行长距离 (如 20 km) HCS 传递时,可在系统本地端加入信号追踪器对 PD 的探测信号稳幅,减小探测信号幅度抖动对分频鉴相的影响,也可在远端加入掺铒光纤放大器 (Bi-EDFA),提高本地端 PD 探测信号的信噪比,进一步保障传递的稳定度。

系统实现相位噪声消除的数学分析如下:首先假设信号幅度稳定,对其做归一化处理。VCSO 输出的射频信号是 $V_1 = \sin(\omega_1 t + \varphi_1)$,其中 ω_1 和 φ_1 为发射信号角频率与初始相位,被电光调制器 (EOM) 调制到激光的光强上并通过光纤链路传递到远端。远端 PD 接收到光强调制信号 $V_1' = \sin(\omega_1 t + \varphi_1 + \varphi_p)$,该信号包含了光纤引入的相位扰动 φ_p 。根据多普勒噪声抑制原理^[17],光纤链路引入的相位噪声主要与路径长度和折射率变化有关,正向传递时引入的相位噪声近似等于反向传递时引入的相位噪声,本地端 PD 解调的远端反射信号可表示为 $V_{\text{back}}' = \sin(\omega_1 t + \varphi_1 + 2\varphi_p)$,该信号包含两次通过光纤引入的噪声。远端反射信号 V_{back} 与本地射频信号 V_1 混频实现频率相加后通过 200 分频,生成 $V_2 = \sin\left(\frac{\omega_1 t}{100} + \frac{\varphi_1}{100} + \frac{\varphi_p}{100}\right)$ 。 V_2 和参考信号 $V_{\text{ref}} = \sin(\omega_r t + \varphi_r)$ 鉴频鉴相输出误差信号 $V_e = \sin\left[\left(\frac{\omega_1}{100} - \omega_r\right)t + \frac{\varphi_1 + \varphi_p}{100} - \varphi_r\right]$,环路滤波器滤除误差信号中的高频噪声后反馈控制 VCSO 对射频信号 V_1 进行相位补偿,使得 $V_e = C$, C 为常数,则有

$$\frac{\omega_1}{100} + \frac{\frac{d\varphi_1}{dt} + \frac{d\varphi_p}{dt}}{100} = \omega_r + \frac{d\varphi_r}{dt}, \quad (1)$$

所以远端的接收信号为 $V_1' = \sin(100\omega_r t + 100\varphi_r)$ 。将 V_1' 进行 100 分频后生成 $V_{\text{ref}}' = V_{\text{ref}}$,完成光纤链路噪声补偿。再通过将恒温晶振 (OCXO) 相位锁定到 V_{ref}' 上,实现对射频信号的高频噪声进行过滤^[18]。

本方案与目前已报道的微波传递实验相比有如下区别:1) 本方案是一个完整的 10 MHz 射频信号通过光纤传递的端到端解决方案。之前报道的传递实验采用 10 GHz 低相位噪声信号源作为微波信号传递的载体,其实验结果并不涉及 10 MHz 射频信号到 10 GHz 微波信号的转换精度。2) 本方案的传递载波频率为 1 GHz,相比于之前的实验,降低了载波频率,虽然在一定程度上会降低传递的极限精度,但考虑系统的集成化和实用性以及电路设计中插入 N 分频器会使变频输出信号的相位噪声增加 $20 \lg N$ dB,选择 1 GHz 传递频率可以有效降低射频信号处理的难度,减少分频电路引入的噪声,且可以满足当前氢钟微波基准的长期稳定度要求。3) 本方案使用低值 VCSO 产生射频信号传递载波,代替之前同类实验的高精度信号源,可以大幅提高系统的集成化和实用化,并降低系统成本。

2 实验结果与讨论

2.1 分频相位噪声补偿电路测试

实验选择 OCXO 过滤后的 HCS 作为频率稳定度测试的参考源^[18],使用 Microsemi 公司的 3120A 相位噪声测量仪评估 10 MHz HCS 提高至 1 GHz 再分频恢复至 10 MHz 的转换精度,即将输出 V_1 代替 V_{back} 输入到分频相位噪声补偿电路的射频输入端,对 VCSO 锁定到 HCS 后输出的信号 V_1 分频至 10 MHz 再输入到相位噪声测量仪进行测试。附加频率稳定度测试结果如图 2(a) 所示,图中实线为 VCSO 相位锁定到参考源后相对于参考源的频率稳定度。图中数据显示频率转换后的附加频率稳定度在 1 s 为 7.6×10^{-14} ,随平均时间接近 $1/\tau$ 下降,在 10000 s 达到 3.8×10^{-17} ,具有较好的长期稳定潜力。该稳定度达到相噪仪的测试极限,长期指标优于

高精度信号源 (比如 R&S SMA100B) 对参考信号的锁相稳定度, 图中红色虚线和黑色虚线分别为实验中测得的 SMA100B 的输出相比于外部输入参考源的频率稳定度和 MHM-2020 数据手册给出的频率稳定度。

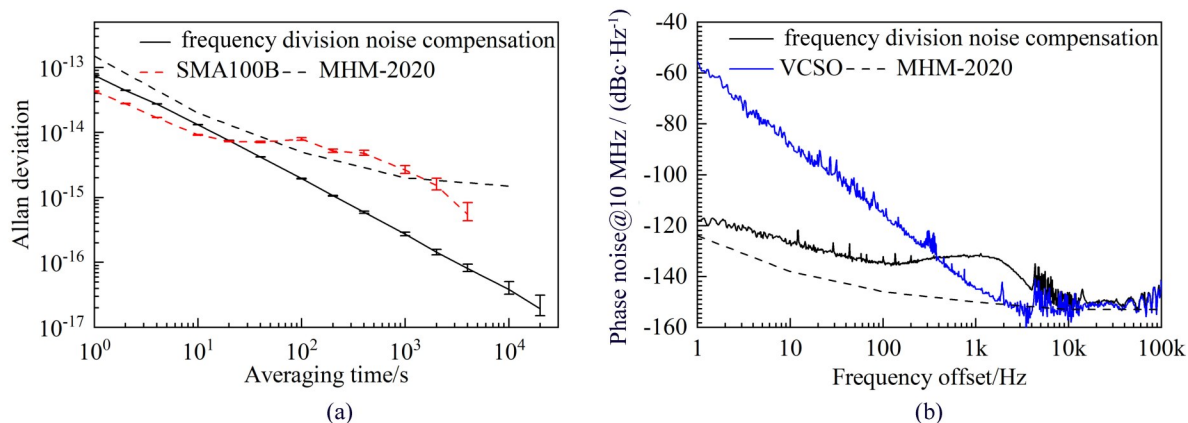


图 2 (a) 分频相位噪声补偿电路附加稳定度测试结果; (b) 残余相位噪声测试结果

Fig. 2 (a) Additional frequency stability test results of frequency division phase noise compensation circuit;

(b) Residual phase noise test results

VCSO 锁相后与自由运转对应的残余相位噪声测试结果如图 2(b) 所示, 图中黑线为 VCSO 锁定到 HCS 后输出信号 V_1 的相位噪声, 蓝线为 VCSO 自由运转的相位噪声, 虚线为 MHM-2020 数据手册给出的相位噪声。锁定后电路本底噪声在 1 Hz 处为 -118 dBc/Hz, 信号的相位噪声在反馈带宽 (1 kHz) 内很好地跟随参考信号, 在反馈带宽外保持与 VCSO 相同的相位噪声水平。可见设计的分频相位噪声补偿电路稳定度上不仅可以满足 HCS 传递的需求, 也可以用于设计高稳定度信号源。

2.2 短距离射频信号多种传递方案比较

为了验证光纤传递主动相位噪声补偿的必要性和效果, 本研究比较了多种微波传递方式引入的噪声对频率稳定度的影响。实验首先选取一段 200 m 往返的实地光纤和一卷 200 m 同轴电缆 (RG223) 进行频率传递对比实验, 分别用 3120A 相位噪声测量仪测试了同轴电缆传递 10 MHz、光纤传递 10 MHz、光纤传递 1 GHz 信号的相位噪声和频率稳定度。为了测试和比较光纤和同轴电缆传递的附加频率稳定度, 在测试中传递信号与相位噪声测量仪的参考信号采用同源信号。实测 200 m 同轴电缆对 10 MHz 信号的衰减为 8.2 dB, 200 m 光纤的衰减小于 0.1 dB。实验测得的三种传递方案的附加频率稳定度和残余相位噪声如图 3 所示。

对比两图中的曲线 a, b, c 可以看出相比于同轴电缆传递, 光纤直接传递 10 MHz 信号有较高的噪声本底, 这个噪声本底很可能是激光器的过剩噪声在 10 MHz 时仍然比较高引起的, 且更容易耦合外界干扰。该噪声导致其在 1000 s 平均时间内频率稳定比同轴电缆直接传递 10 MHz 差, 在 5000 s 平均时间以上的光纤传递 10 MHz 的附加频率稳定度与同轴电缆相当。当传递频率提高到 1 GHz 时, 光纤传递稳定度在 1000 s 平均时间内接近同轴电缆的传递稳定度, 在 1000 s 后的长期稳定度优于同轴电缆。相位噪声在低频段比同轴电缆传递高了 10 dB 以上, 这部分相位噪声部分是由 PD 和功率放大器引入, 部分是因为光纤是从地下实验室连接到六楼实验室, 由于架空较多, 振动扰动较大导致。

从这几个不同传递方案的对比结果可以看出, 将传递频率提高能有效减少传递过程中受到的干扰, 提高传递稳定度。传递系统的相位噪声和短期稳定度受所选器件的本底噪声影响, 外界环境对传递系统的影响

主要体现在长期稳定度。当传递距离较短时, 光纤链路引入的相位噪声小, 采用自由链路光纤频率传递方案可以比采用同轴电缆更有效地保持信号的长期频率稳定度。

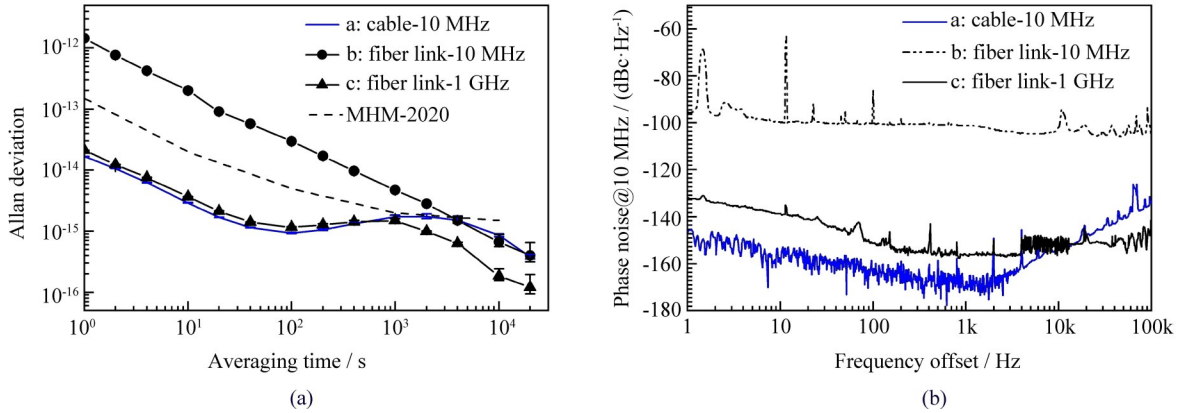


图3 不同微波传递方案的比较。(a) 附加频率稳定度; (b) 残余相位噪声

Fig. 3 Comparison of different microwave transmission schemes. (a) Additional frequency stability; (b) Residual phase noise

之后在 200 m 实地光纤链路上测试了 HCS 传递系统的附加频率稳定度和残余相位噪声, 实验比较了自由链路与噪声补偿后的传递精度, 测试结果如图 4 所示。

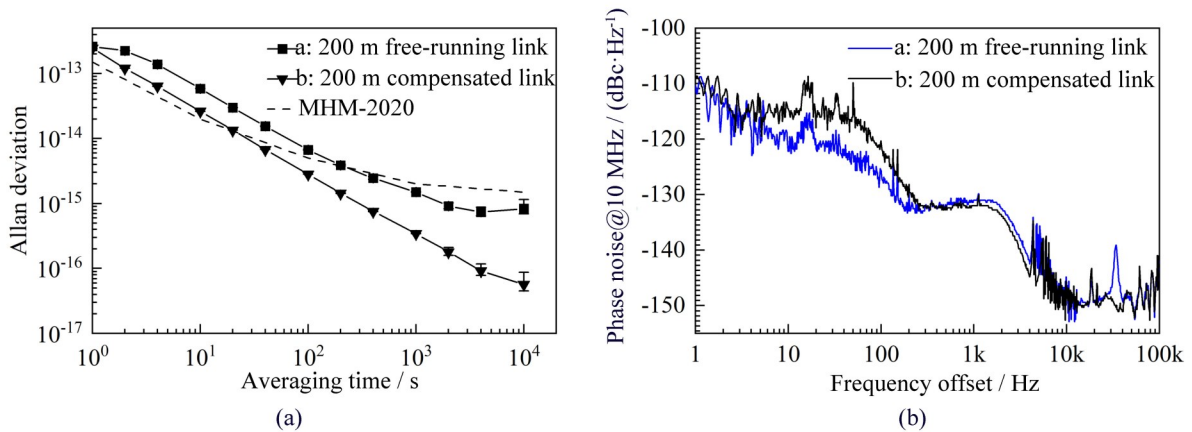


图4 (a) 200 m 光纤上 HCS 传递系统附加频率稳定度; (b) 残余相位噪声

Fig. 4 (a) Additional frequency stability of HCS transferring system over 200 m optical fiber; (b) Residual phase noise

对比两图中的曲线 a, b 可以看出噪声补偿系统的低频段相位噪声比自由链路传递略高, 这部分相位噪声主要是噪声补偿方案中所选器件的本底噪声。在短距离传递时, 光纤链路引入的相位噪声小于噪声补偿方案中器件引入的相位噪声。从频率稳定度测试结果看, 由于补偿了环境变化引入的相位噪声, 系统的附加频率稳定度随平均时间以 $1/\tau$ 的关系下降, 在 20 s 内会对 HCS 的稳定度有所降低, 但 10000 s 附加稳定度达到 5.7×10^{-17} , 远优于自由链路光纤传递。

由上面的测试实验可以有如下结论: 在 200 m 的范围内, 采用同轴电缆直接传递 HCS, 虽然信号衰减较大 (达到 8 dB 左右), 但传递的附加频率稳定度指标可以满足大部分 HCS 传递的需求。当基准源的长期频率稳定度优于 1×10^{-15} (比如铯喷泉钟) 时, 即使传递距离在 200 m 以内也需要采用反馈噪声消除的光纤微波传递方案以保持基准源经过传递后的频率稳定度。

2.3 长距离光纤传递测试

在长距离(千米及以上距离)传递中,由于同轴电缆的损耗过大,一般不采用同轴电缆作为传递中介,因而本研究仅在光纤链路中开展频率基准的传递实验。在一卷 20 km 的光纤上,测试了 HCS 传递系统的附加频率稳定性和残余相位噪声,比较了自由链路 with 噪声补偿后的传递精度,测试结果如图 5 所示。从图 5(b) 可以得出,补偿后的系统残余相位噪声在 1 Hz 到 10 Hz 处相对于自由链路有 10 dB 的抑制,达到 -112 dBc/Hz 至 -116 dBc/Hz,与前面的测试结果相当,接近于分频相位噪声补偿电路的本底。在 10 Hz 以上的相位噪声相比于短链路较大,这是由于链路较长,链路本身引入的噪声增加,同时反馈时延变长,反馈带宽减小,降低了系统的相位噪声补偿能力。图 5(a) 显示补偿后传递系统的附加频率稳定度比自由运转有所提高,在 1 s 处为 4.8×10^{-13} ,与高稳定晶振的水平相当,1000 s 内随平均时间呈 $1/\tau$ 下降。在 100 s 平均时间之后系统的附加频率稳定度低于主动型氢钟的频率稳定度,10000 s 平均时间系统附加频率稳定度达到 2.1×10^{-16} 。在 3000 s 附近系统的附加频率稳定度凸起与环境空调温控周期有明显关联,可能是因为系统受温度调制导致。

由于在高精度频率测量(比如微波钟、光钟的稳定度测量)中,更关注参考信号的长期频率稳定度(10000 s 及以上平均时间的频率稳定度),本系统很大程度上可以满足 20 km 及以内距离传递 HCS 的要求,基本满足同一科研园区内不同建筑之间共享 HCS 的需求。

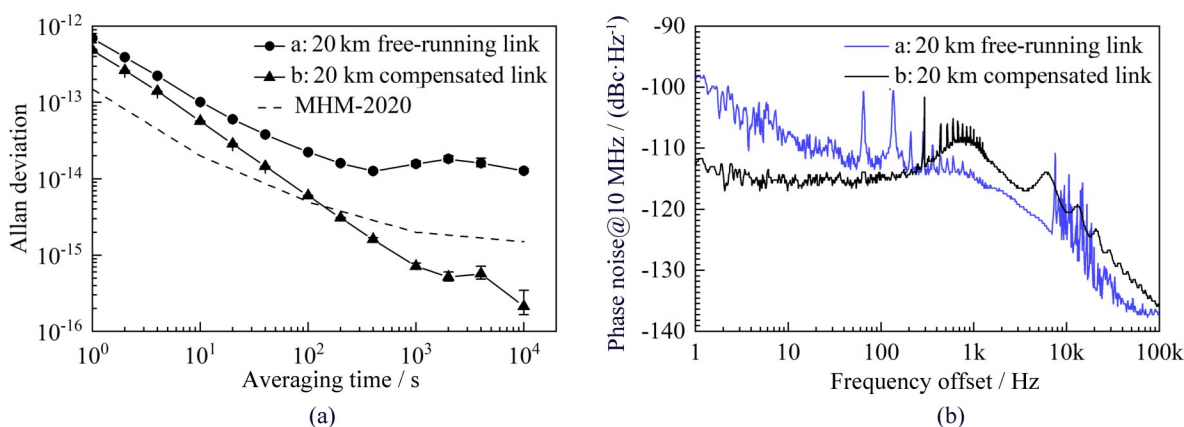


图 5 (a) 20 km 光纤上 HCS 传递系统附加频率稳定度; (b) 残余相位噪声

Fig. 5 (a) Additional frequency stability of HCS transferring system over 20 km optical fiber; (b) Residual phase noise

3 结 论

本研究介绍了一种基于光纤链路的 10 MHz HCS 端到端传递系统。该方案将 HCS 提高到 1 GHz 后,调制到激光光强上利用光纤传递至远端。本地端通过将远端反射信号与本地信号和频后分频锁相到 HCS,实现光纤链路的相位噪声补偿。远端 PD 解调的 1 GHz 信号分频至 10 MHz,完成 HCS 到远端的传递。该系统在 200 m 光纤上实现了 1 s 平均时间 2.4×10^{-13} 和 10000 s 平均时间 5.7×10^{-17} 的传递稳定度,相比传统的同轴电缆传递,信号衰减变弱,提高了射频信号传递的长期稳定度;在 20 km 卷轴光纤上实现了 1 s 平均时间 4.8×10^{-13} 和 10000 s 平均时间 2.1×10^{-16} 的传递稳定度。测试结果表明本方案在补偿带宽内有效改善了相位噪声,提高了传递稳定度,基本可以满足千米距离范围内同一科研园区不同建筑之间 HCS 传递长时间稳定度的需求,是一种可行的低成本局域 HCS 共享方案。

参考文献:

- [1] Dong S W. *Study on Several Important Technical Issues in Time-keeping* [D]. Xi'an: National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, 2007.
董绍武. 守时中的若干重要技术问题研究 [D]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2007.
- [2] Microsemi. MHM-2020 active hydrogen maser [OL]. https://www.microsemi.com/document-portal/doc_view/1244235-microchip-mhm-2020-maser-data-sheet.
- [3] Yang W K. *The Study of Phase Noise Analysis and Identification* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.
杨文可. 时频信号相位噪声分析与辨识研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
- [4] Fujieda M, Gotoh T, Nakagawa F, *et al.* Carrier-phase-based two-way satellite time and frequency transfer [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2012, 59(12): 2625-2630.
- [5] Williams P A, Swann W C, Newbury N R. High-stability transfer of an optical frequency over long fiber-optic links [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2008, 25(8): 1284-1293.
- [6] Droste S, Ozimek F, Udem T, *et al.* Optical-frequency transfer over a single-span 1840 km fiber link [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(11): 110801.
- [7] Schioppo M, Kronjäger J, Silva A, *et al.* Comparing ultrastable lasers at 7×10^{-17} fractional frequency instability through a 2220 km optical fibre network [J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 212.
- [8] Lopez O, Amy-Klein A, Daussy C, *et al.* 86-km optical link with a resolution of 2×10^{-18} for RF frequency transfer [J]. *The European Physical Journal D*, 2008, 48(1): 35-41.
- [9] Marra G, Margolis H S, Lea S N, *et al.* High-stability microwave frequency transfer by propagation of an optical frequency comb over 50 km of optical fiber [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(7): 1025-1027.
- [10] Wang B, Gao C, Chen W L, *et al.* Precise and continuous time and frequency synchronisation at the 5×10^{-19} accuracy level [J]. *Scientific Reports*, 2012, 2: 556.
- [11] Xue W X, Zhao W Y, Quan H L, *et al.* Microwave frequency transfer over a 112-km urban fiber link based on electronic phase compensation [J]. *Chinese Physics B*, 2020, 29(6): 064209.
- [12] Zhao C C, Zhao W Y, Xue W X, *et al.* Microwave frequency dissemination via 50 km optical fiber based on optical delay compensation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(8): 0806002.
赵粹臣, 赵文字, 薛文祥, 等. 基于光学时延补偿的 50 km 光纤微波频率传递 [J]. 光子学报, 2020, 49(8): 0806002.
- [13] Quan H L, Zhao W Y, Xue W X, *et al.* High-resolution microwave frequency dissemination via 56 km optical fiber based on microwave phase compensation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(4): 0406003.
全洪雷, 赵文字, 薛文祥, 等. 基于微波相位补偿的 56 km 高精度光纤微波频率传递 [J]. 光子学报, 2021, 50(4): 0406003.
- [14] Wang J, Yue C, Xi Y, *et al.* Fiber-optic joint time and frequency transfer with the same wavelength [J]. *Optics Letters*, 2019, 45(1): 208-211.
- [15] Lu Z, Gui Y Z, Wang J J, *et al.* Fiber-optic time-frequency transfer in gigabit ethernet networks over urban fiber links [J]. *Optics Express*, 2021, 29(8): 11693-11701.
- [16] Zhang Z R, Wang Y F, Qu M X, *et al.* Analysis of phase noise in digital phase-locked loop [J]. *Electric Drive*, 2021, 51(11): 15-19.
张占荣, 王云飞, 屈美霞, 等. 数字锁相环的相位噪声分析 [J]. 电气传动, 2021, 51(11): 15-19.
- [17] Ma L S, Jungner P, Ye J, *et al.* Delivering the same optical frequency at two places: Accurate cancellation of phase noise introduced by an optical fiber or other time-varying path [J]. *Optics Letters*, 1994, 19(21): 1777-1779.
- [18] Yao B W, Sun H Y, Chen Q F. Terminal noise filtration of hydrogen clock signal after transmission [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2019, 36(6): 709-713.
姚博文, 孙焕尧, 陈群峰. 氢钟信号传输后的末端噪声过滤 [J]. 量子电子学报, 2019, 36(6): 709-713.