

引用格式: 全洪雷, 薛文祥, 赵文宇, 等. 国家授时中心高精度光纤微波频率传递研究进展[J]. 时间频率学报, 2021, 44(4): 255-265.

国家授时中心高精度光纤微波频率传递研究进展

全洪雷^{1,2,3}, 薛文祥^{1,2}, 赵文宇^{1,2,3}, 邢燕^{1,2},

姜海峰^{1,2,3}, 刘涛^{1,2,3}, 张首刚^{1,2,3}

1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
2. 中国科学院 时间频率基准重点实验室, 西安 710600;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了实现远距离用户间的高精度频率信号同步, 以及满足高精度地基授时系统的建设需求, 中国科学院国家授时中心开展了高精度光纤微波频率传递研究。利用微波相位补偿方案, 在 112 km 实地光纤上实现了高精度微波频率传递, 获得了 4.2×10^{-15} @ 1 s 和 1.6×10^{-18} @ 1 d 的传递稳定度。与光学相位补偿方案相比微波相位补偿方案的实验结构更加简单, 更加廉价, 更适合大规模的工程建设。结合地基授时系统的长距离光纤微波频率的传递需求, 基于同样的微波相位补偿方案, 搭建了 3 套单段 100 km 的光纤微波频率传递系统, 在 300 km 的光纤卷轴上进行了级联传递实验, 获得了 1.1×10^{-14} @ 1 s 和 6.8×10^{-18} @ 10^5 s 的传递稳定度, 该实验结果对高精度地基授时系统的建设有着支撑作用。

关键词: 光纤; 微波频率; 频率传递; 稳定度

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2021-04-0255-11

Progress of high-resolution fiber-based microwave frequency dissemination in NTSC

QUAN Hong-lei^{1,2,3}, XUE Wen-xiang^{1,2}, ZHAO Wen-yu^{1,2,3}, XING Yan^{1,2},

JIANG Hai-feng^{1,2,3}, LIU Tao^{1,2,3}, ZHANG Shou-gang^{1,2,3}

1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to achieve the synchronization of the high-precision frequency signal between the long-distance users and meet construction needs of the High-precision Ground-based Time Service System, the National Time Service Center (NTSC) has carried out the research on fiber-based microwave frequency transmission. Based on microwave phase compensation, the single-stage microwave frequency dissemination experiment via a 112 km urban fiber was carried out, and an instability of 4.2×10^{-15} at 1 s and 1.6×10^{-18} at 1 d was

收稿日期: 2021-04-28; 接受日期: 2021-07-09

基金项目: 中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部青年学者”资助项目(29202082)

achieved. Furthermore, a cascaded fiber-based microwave frequency dissemination experiment was carried out via 300 km fiber spools with three 100 km single-stage dissemination systems, exhibiting an instability of 1.1×10^{-14} at 1 s and 6.8×10^{-18} at 10^5 s. Compared to the optical phase compensation scheme, the microwave phase compensation scheme is of simple structure and less pricy, and is thus more suitable for large-scale engineering construction. The results of this research are a good support for the construction of the High-precision Ground-based Time Service System.

Key words: fiber; microwave frequency; frequency dissemination; instability

0 引言

高精度频率信号远距离传递在基础物理研究^[1]、射电天文观测^[2-3]、时间频率计量^[4]等领域中有着重要的应用。目前进行高精度频率信号的传递方式主要有：基于卫星链路的卫星共视^[5]、卫星双向时间频率传递^[6-8]，以及基于光纤链路的频率信号传递。虽然基于卫星链路的时间频率传递距离可以达到数千 km，可以用于洲际间传递，但易受大气扰动，卫星轨道波动等因素的影响，基于卫星链路的传递手段抗干扰性较差。而基于光纤链路的频率信号传递借助于光纤介质的损耗低、抗干扰性强、可持续性强等优点，可以实现更高精度的频率传递。在过去的二十年中，基于光纤的时间频率传递引起了世界各国的广泛研究^[7]。目前，欧洲已经建成泛欧的光纤时频传递网络^[9-12]，我国也启动了覆盖全国的基于实地通讯光纤的时间频率传递网络建设（国家十三五重大科技基础设施—高精度地基授时系统）。

基于光纤的频率信号传递方法，可以根据所传递的信号种类分为光频传递、光学频率梳信号传递和微波信号传递。光纤光频传递可以实现 1×10^{-20} @ 10^4 s 的传递稳定度^[11-13]，满足光钟频率信号的远距离传递，但所传递的是光学频率无法被电子学设备直接使用，通常需要借助于光学频率梳。光纤光学频率梳传递具有同时传递光频信号与微波信号的优点^[14-15]，但使用时会受限于光学频率梳的高成本。光纤微波频率传递利用微波频率信号强度调制到载波激光上，通过光纤传递到远端。目前，广泛应用的原子频标都工作在微波频段，而且微波信号也可以被电子学设备直接使用，所以光纤微波频率传递具有广泛的应用需求。根据对光纤链路噪声的补偿原理不同，基于光纤的微波频率传递可以分为：光学相位补偿与微波相位补偿两类。光学相位补偿是通过光纤拉伸器与温控光纤卷轴同时作用，控制信号光在光纤链路中的传输时延，实现对光纤链路的附加扰动噪声的补偿。2006—2010 年法国巴黎天文台基于光学相位补偿原理，在 86 km 实地通信光纤上进行了一系列实验研究^[13, 16-17]，在 2010 年实现传递稳定度为 1×10^{-15} @ 1 s 和 2×10^{-19} @ 1 d 的 9.15 GHz 微波频率信号传递^[17]。2020 年中国科学院国家授时中心基于光学相位补偿原理，实现 10 GHz 频率信号 50 km 传递，稳定度为 4.38×10^{-15} @ 1 s 和 2.80×10^{-18} @ 65.5×10^3 s^[18]。而微波相位补偿，通过调整发射信号的相位，实现对光纤链路噪声的补偿。2012 年清华大学—中国计量科学研究院联合实验小组利用微波相位补偿方案，在 80 km 光纤上，实现稳定度为 7×10^{-15} @ 1 s 和 5.3×10^{-19} @ 1 d 的 9.1 GHz 微波频率信号传递^[19]。但无论采用哪种补偿方式，单段光纤微波频率传递的噪声补偿带宽会随着传递距离的增加而减小，解调的传递信号信噪比也随着传递的距离的增加而降低。所以对于超长距离的微波频率传递，需要将光纤链路分割成多段链路，进行级联传递。在实际应用中，如果多个远端用户呈线性分布，采用级联的方式进行频率传递，还可以同时为多个用户提供标准频率信号。2010 年日本国家信息与通信研究院在 204 km 城市光纤上进行级联微波频率传递实验，稳定度为 6×10^{-14} @ 1 s 和 5×10^{-17} @ 1 d^[20]。2015 年清华大学利用基于微波相位补偿的传递设备在实验室光纤上实现了 145 km 的级联传递，稳定度为 1.3×10^{-14} @ 1 s 和 4.1×10^{-17} @ 10^4 s^[21]。2016 年上光所基于光学相位补偿在京沪光纤干线上实现了 430 km 的级联传递，稳定度为 1.02×10^{-13} @ 1 s 和 8.24×10^{-17} @ 10^4 s^[22]。由于

光学相位补偿需要同时使用光纤拉伸器与温控光纤卷轴，以及光纤温控卷轴的体积较大。在进行多段传递设备级联传递时，实验结构更为复杂繁琐。相比于光学相位补偿方案，结构简单的微波相位补偿方案更适用于级联传递，实现超远距离微波频率传递。中国科学院国家授时中心针对高精度地基授时系统的建设需要，也开展了基于微波相位补偿的级联光纤微波频率长距离传递研究。

本文将介绍国家授时中心在光纤微波频率传递方面的研究工作进展，包括光纤微波频率传递系统的研制，单段 112 km 光纤微波频率传递实验^[23]，以及利用实验室光纤进行 300 km 级联光纤微波频率传递实验^[24]。

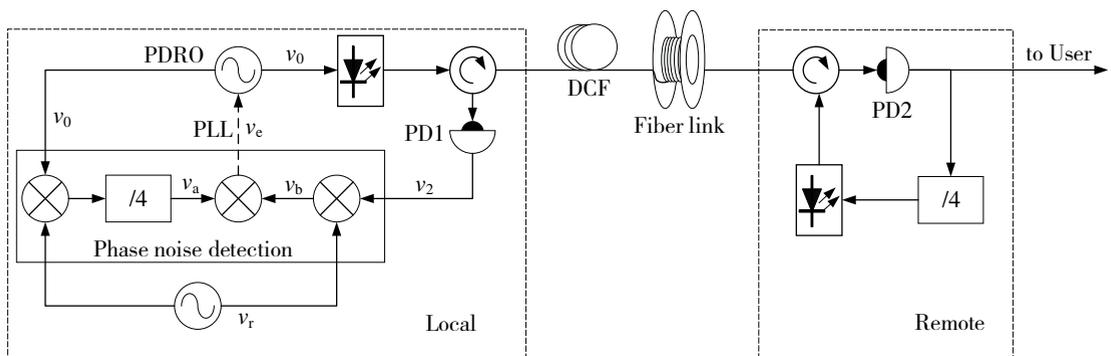
1 传递系统基本原理

当频率信号沿光纤链路传递时，由于外界的机械振动与温度变化的影响使标准频率信号的相位噪声恶化，降低了传递稳定度。为了实现频率信号的高精度传递，通常使信号沿着相同的光纤链路往返传递一次，并假定往返传递所需的时延相同。传递系统在本地端通过比较往返传递信号的相位变化，获得单向传递时光纤链路所引入的相位扰动，并在本地端利用锁相环对光纤引入的相位扰动进行实时补偿，使远端用户获得稳定的频率信号。

光纤微波频率传递系统的实验原理如图 1 所示，传递系统由本地端与远端组成，并在本地端进行链路噪声的探测与补偿。在本地端，参考信号为 $v_r = \sin(\omega_r t + \varphi_r)$ （不考虑信号的幅度），锁相介质谐振振荡器（phase-lock dielectric resonance oscillator, PDRO）产生发射信号 $v_0 = \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$ 。将 v_0 发送到远端，在远端利用光电探测器（photodetector, PD）解调得到 $v_1 = \sin(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi_p)$ ，其中 φ_p 为光纤链路所引入的相位扰动。将 v_1 4 分频后回传到本地端，形成往返不同的传输频率，以便于区分主信号与寄生反射信号，克服光纤链路中寄生反射的影响。由于光纤链路引入的相位扰动与频率成正比，所以在本地端得到回传信号 $v_2 = \sin(0.25\omega_0 t + 0.25\varphi_0 + 0.5\varphi_p)$ 。 v_2 与 v_r 混频后得到 v_a 。发射信号 v_0 与 v_r 混频后 4 分频得到 v_b 。 v_a 与 v_b 混频后得到误差信号：

$$v_e = \sin \left[\left(\frac{2\omega_0 - 5\omega_r}{4} \right) t + \frac{2\varphi_0 + 2\varphi_p - 5\varphi_r}{4} \right] \quad (1)$$

误差信号经环路滤波器后，对 PDRO 进行反馈控制。当发射信号频率 ω_0 与参考信号频率 ω_r ，满足 $\omega_0 = 2.5\omega_r$ 的关系时，可以控制发射信号相位为 $\varphi_0 = 2.5\varphi_r - \varphi_p$ ，使 $v_e = 0$ ，实现对光纤链路引入的相位扰动进行预补偿，使远端接收信号相位锁相在本地参考号上。



注：PDRO 为锁相介质谐振振荡器（phase-lock dielectric resonance oscillator）；PD 为光电探测器（photodetector）；DCF 为色散补偿光纤（dispersion compensation fiber）；PLL 为锁相环（phase locked loop）

图 1 传递系统基本原理

光纤链路的色散会使信号光展宽,进而造成信号光所携带的微波信号相位发生改变,使光电探测器解调得到的微波信号时引入额外的噪声,使传递稳定度下降。为了避免光纤链路色散的影响,通常会在光纤链路中接色散补偿光纤,引入与光纤链路色散量相等的负色散,以改善光电探测器解调的微波信号的相噪,提高传递稳定度。

随着传递距离的增加,光纤链路的衰减使远端解调得到的微波信号的信噪比下降,降低传递稳定度。同时光纤频率传递的控制带宽受限于 $1/4\tau$ (τ 为光纤链路的传输时延),所以控制带宽随传递距离的增大而减小,造成对链路噪声的补偿能力下降。为实现远距离光纤微波频率传递,通常将多段传递系统级联起来,即上一段传递系统的远端接收信号为下一段传递系统的参考信号,如图 2 所示。这样既可以保证远端探测得到的微波信号的信噪比,也可以提高链路噪声的抑制能力。

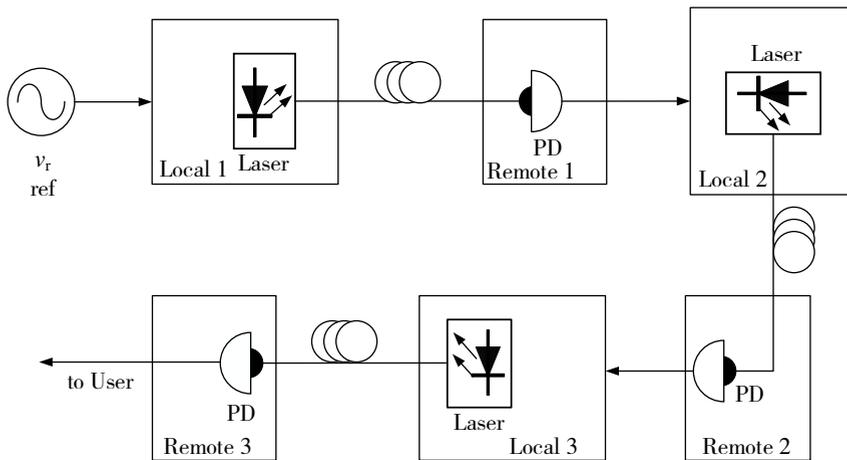


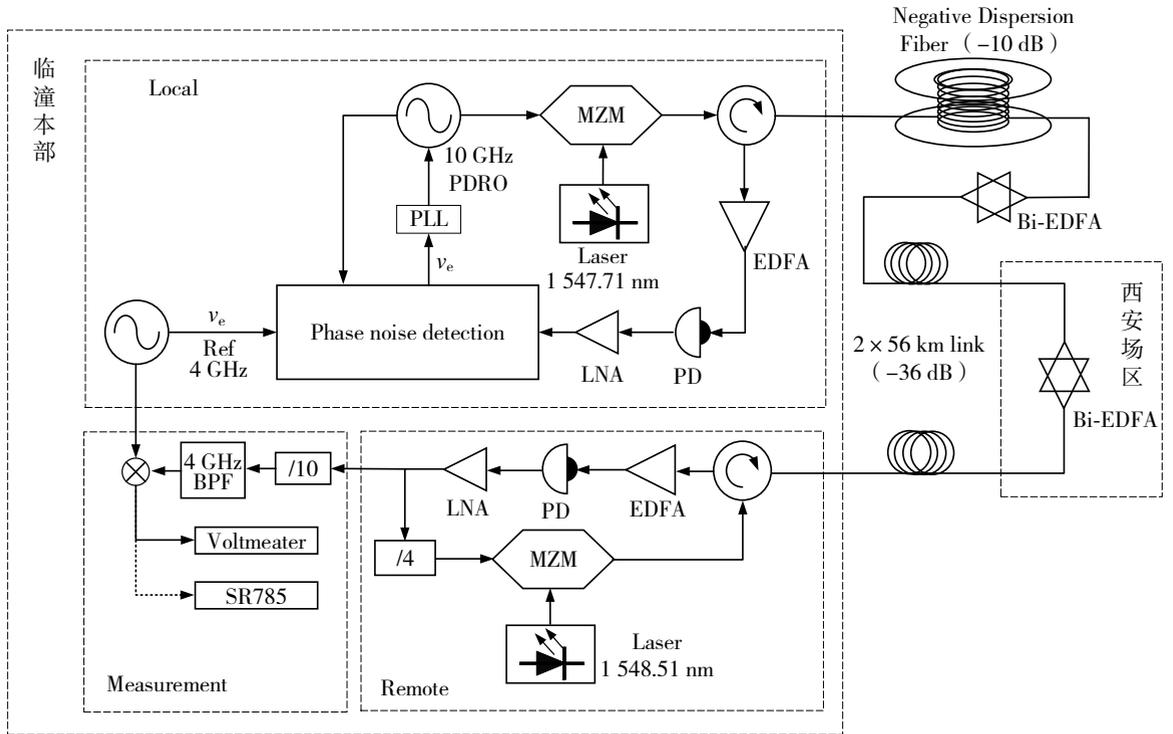
图 2 级联传递系统

2 单段 112 km 光纤微波频率传递

根据上述原理我们将参考频率选择为 4 GHz,发射频率为 10 GHz,搭建了一个 10 GHz 光纤微波频率传递实验系统,如图 3 所示。我们利用该系统在国家授时中心临潼本部—西安导航试验场区间的实地通信光纤上进行微波频率传递实验。一般实地光纤链路损耗较大,经测试,临潼本部—西安导航试验场区—临潼本部 112 km 的光纤链路总衰减达到 36 dB (折合约 0.32 dB/km),大于光纤的标称值 22.4 dB (0.2 dB/km)。为提高信噪比,我们在西安导航试验场区接入一个双向掺铒光纤放大器 (EDFA),其增益约为 15 dB。

在本地端 10 GHz PDRO 产生 10 GHz 发射信号,并通过马赫曾德尔调制器 (Mach-Zehnder Modulator, MZM),将发射信号强度调制到波长为 1 547.71 nm 的载波激光上,经光纤发送到远端。在远端将该微波信号利用 PD 解调出来并 4 分频 (HMC365) 后,调制到波长为 1 548.51 nm 的载波激光上回传到本地端。在本地端进行链路噪声测量,并利用锁相环控制微波发射信号相位对链路噪声进行实时补偿,使远端获得稳定的频率信号。实验中,我们将发射端激光波长设为 1 547.71 nm,接收端激光波长设为 1 548.51 nm;使发射端与接收端的激光波长略微差开 0.8 nm,以避免相干瑞利散射的影响。在 112 km 的光纤链路 (SM-28e) 中总色散量为: $112 \text{ km} \times 17 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$,长距离光纤链路的色散会使信号光展宽,使 PD 解调的微波信号的信噪比下降,降低传递稳定度。为了降低色散的影响,在光纤链路中接入与 112 km 光纤链路色散量对应的负色散补偿光纤,对光纤链路的色散进行补偿,改善接收信号的相噪,提高传递的稳定度。色散补偿光纤的损耗约为 10 dB,因此我们在发射端与 112 km 光纤链路间接入另一个双向掺

辑光纤放大器 (EDFA) 以对光的衰减进行补偿。



注：LNA 为低噪声放大器；Bi-EDFA 为双向掺铒光纤光放大器；EDFA 为单向掺铒光纤光放大器；PD 为光电探测器

图 3 112 km 光纤微波频率传递实验示意图

为了评估该传递系统的性能，我们测量远端复现的 10 GHz 信号相对于本地端 4 GHz 参考信号在时域中的稳定度—用 Allan 方差来表征。在频域中测量远端 10 GHz 信号相对于本地端 4 GHz 参考信号的剩余相位噪声。

通常是利用相噪仪或者计数器来测量信号的稳定度，但这些仪器的测量范围通常小于 1 GHz，无法直接测量高频信号。于是我们采用外差法（也称拍频法）进行测量，并设计了如图 3 中的测试模块，测试模块的剩余噪声和稳定度优于系统的传递底噪，如图 5 曲线（d）所示。将远端接收的 10 GHz 信号 10 分频后，利用一个 4 GHz 带通滤波器获得分频信号的 4 次谐波信号（4 GHz），然后与本地端 4 GHz 参考信号进行混频后得到近似直流的鉴相电压信号 $v(t)$ 。利用万用表（Keysight 3458A）测量 $v(t)$ ，并以 1 s 的采样间隔记录数据。 $v(t)$ 反应了两信号的相位差，从该相位差的变化可以利用公式（2）计算出每一秒的传递时延差：

$$\Delta t = \frac{1}{2\pi f} \arcsin\left(\frac{v(t)}{A}\right), \quad (2)$$

并利用 Δt 计算 Allan 方差表征传递稳定度。

同时利用快速傅里叶变换分析仪（SR785）测量 $v(t)$ 的幅度噪声，可以得到远端接收的 10 GHz 频率信号相对于本地 4 GHz 参考信号的剩余相位噪声，即补偿链路的剩余相位噪声。

自由链路和补偿链路剩余噪声如图 4 所示，其中曲线（a）为远端 10 GHz 接收信号相对于本地端 10 GHz 发射信号的剩余相位噪声，该曲线可以直接反应出 112 km 自由光纤链路的噪声情况。曲线（b）为 112 km 补偿链路的剩余相位噪声。曲线（c）为 0 km 光纤链路（利用光纤衰减器代替实际光纤链路）补偿后的剩余噪声，可以反映传递系统所能补偿的极限。曲线（b）与（c）在 1~100 Hz 处的噪声相当，说明系统可以很好地对链路噪声进行补偿。

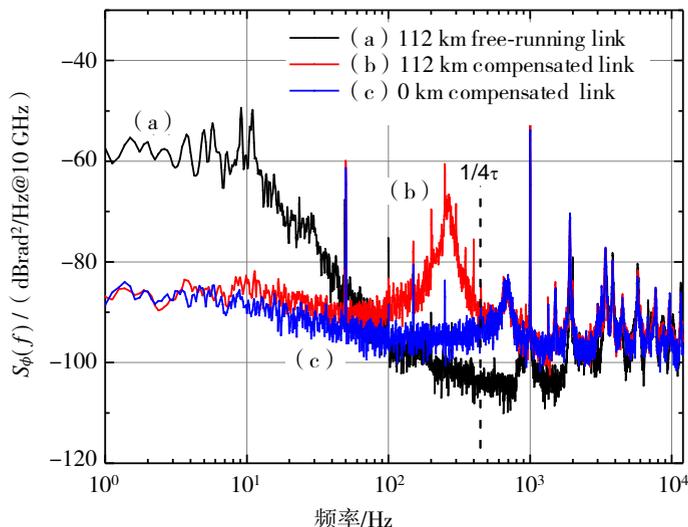


图 4 112 km 传递剩余相位噪声

图 5 中的圆点曲线 (a) 展示了 10 GHz 传递系统在 112 km 光纤上所获得的传递稳定度, 稳定度为 4.2×10^{-15} @ 1 s 和 1.6×10^{-18} @ 1 d。方块曲线 (b) 为自由链路运转时, 将 10 GHz 标准频率信号直接经光纤发送到远端, 远端接收的 10 GHz 信号相对于本地端 10 GHz 标准信号的稳定度。为了确定系统的传递稳定度极限, 通常利用光纤衰减器来代替光纤链路, 以达到无链路噪声引入的条件。三角曲线 (c) 为利用光纤衰减器代替光纤链路的传递系统底噪。系统的 112 km 传递稳定度与系统的底噪的短期稳定度有着很好的吻合。实验中由于本地端与远端均位于同一间实验室内, 本地端的 10 GHz 发射信号的相位处于不断的变化中, 由于微波泄露使发射信号泄漏到测试模块中, 形成信号串扰, 使 112 km 的长期传递稳定度恶化。同时室外温度的波动使光纤链路的折射率处于变化中, 而由于往返传递的信号光的波长不同导致, 往返传递的信号存在一定的时延差使长期稳定度变差。两者共同作用使 112 km 的传递稳定度高于系统的传递底噪。

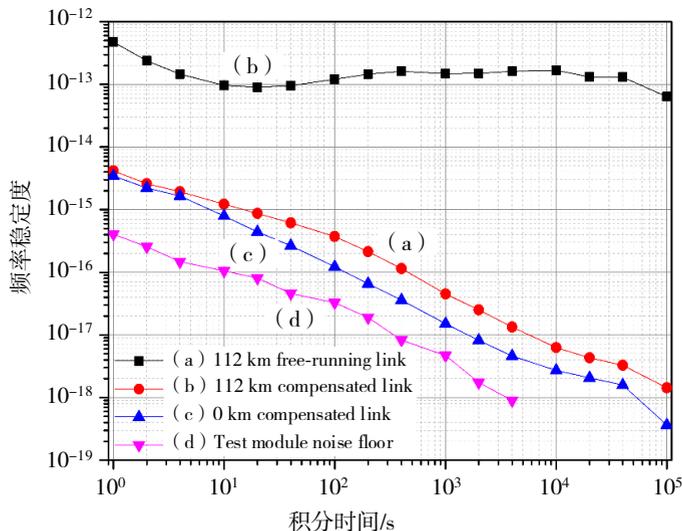


图 5 112 km 传递稳定度

我们将法国巴黎天文台 (LNE-SYRTE)、清华大学 (THU) 已报道的成果总结在表 1 中。我们传递的频率是较高的 10 GHz 可以获得很好的鉴相分辨率, 同时我们往返传递信号采用不同的频率可以很好地避免寄生反射的影响。所以我们获得了很好的短期稳定度。长期稳定度主要受限于载波激光波长差造成的往返传递时延不对称, 当外界环境温度变化时光纤链路的折射率也随温度变化, 使往返传递的时延

差出现波动,使长期稳定度下降。这种由于光纤链路色散引起的往返传递时延差的波动,可以通过减小往返载波激光的波长进行改善。由于该传递系统具有避免寄生发射影响的能力,对环境的适应性较强,非常适合在情况复杂多变的城市通信光纤上进行微波频率传递。

表1 单段传递系统指标对比

研究机构	补偿方式	传递距离 /km	稳定度 /@ 1 s	稳定度 /@ 10^4 s	稳定度 /@ 1 d	测试频率 /GHz	参考文献
LNE-SYRTE	光学相位补偿	86	1.2×10^{-14}	5×10^{-17}	1×10^{-17}	0.1	[16]
LNE-SYRTE	光学相位补偿	86	1.3×10^{-15}	1.5×10^{-18}	$< 10^{-18}$	9.15	[17]
THU	微波相位补偿	80	7×10^{-15}	4×10^{-18}	5×10^{-19}	9.1	[18]
NTSC	微波相位补偿	112	4.2×10^{-15}	7×10^{-18}	1.6×10^{-18}	10	[22]

3 300 km 光纤微波频率级联传递实验

由于单段光纤微波频率传递系统的锁相带宽受限于 $1/4\tau$ (其中 τ 为链路的传输时延),同时也由于光衰减导致远端由光电探测器(PD)解调的微波信号的信噪比也随着传递距离的增加而变差。因此必须采用将多套光纤微波频率传递设备级联起来的方式,才能实现几百 km 甚至千 km 级的远距离传递。由于系统采用微波相位补偿原理,对链路噪声进行补偿。在发射端发射信号的相位处于不断的变化中,但这种相位不断变化的信号会泄露到上一级单段传递系统的远端,使上一段传递系统的测试稳定度下降,因此相邻的两级单段传递系统最好选择不同的传递频率。

为了实现级联传递,我们根据上述原理搭建了两套 9 GHz 传递系统,与上述 112 km 传递实验中所用的 10 GHz 传递系统,共同进行光纤微波频率级联传递实验。根据锁相关系 9 GHz 传递系统的参考频率为 3.6 GHz。将 3 套传递设备以如图 6 所示的顺序先后级联起来,形成一个 3 段级联微波频率传递实验系统。

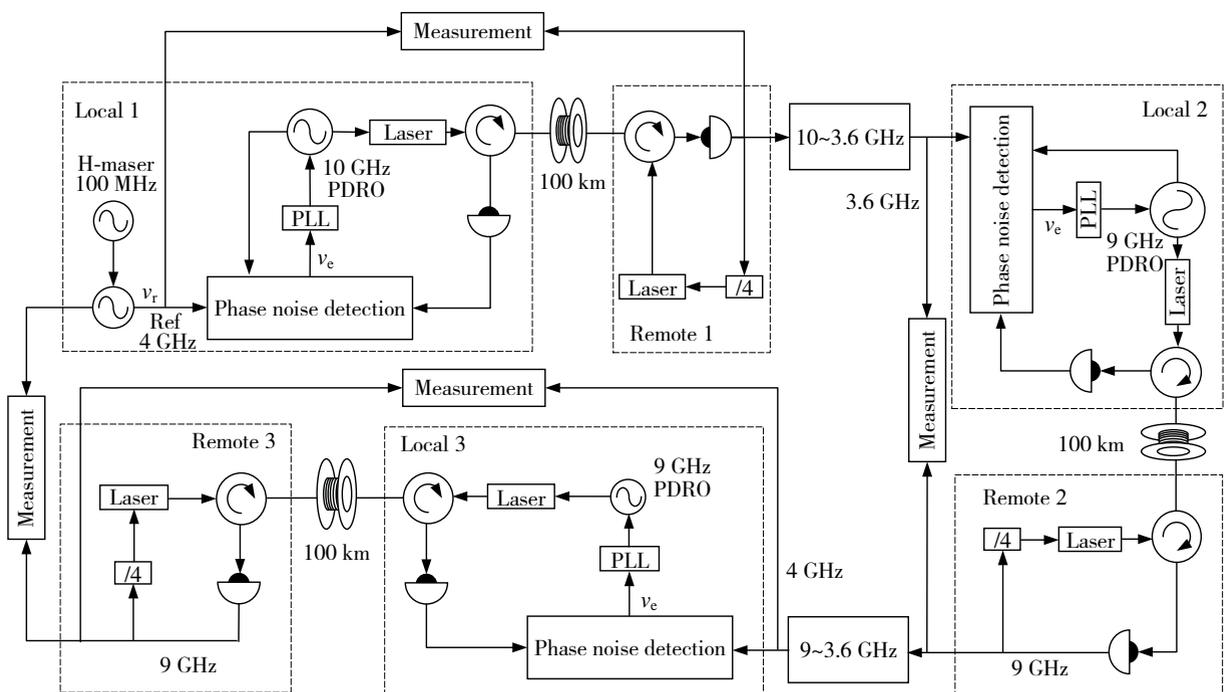
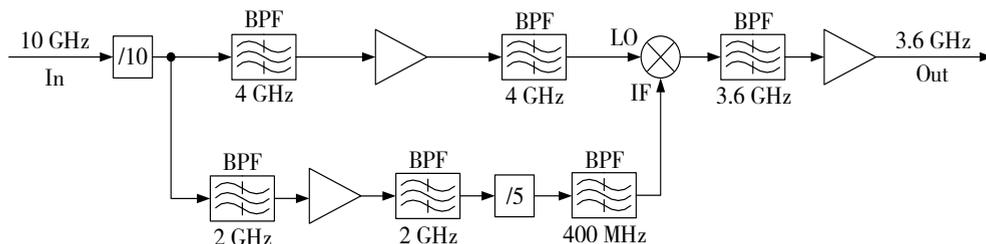


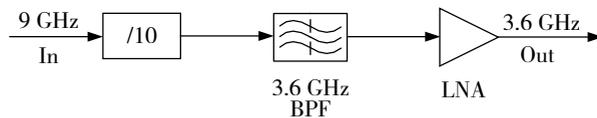
图6 级联 300 km 光纤微波频率传递

根据锁相原理, 经过第一段 10 GHz 传递系统在远端 1 获得 10 GHz 频率信号。而第二段 9 GHz 传递系统却需要 3.6 GHz 参考信号。于是需要在远端 1 与本地端 2 之间加入一个 10 GHz 转 3.6 GHz 低噪声频率转换模块如图 7 (a) 所示。远端 1 的 10 GHz 信号经过一个谐波丰富的十分频器分频后功分两路, 其中一路利用 4 GHz 带通滤波器, 选择出 4 GHz 谐波; 另一路利用 2 GHz 带通滤波器选择出 2 GHz 谐波, 随后将 2 GHz 进行 5 分频, 得到 400 MHz 信号。该 400 MHz 信号与 4 GHz 信号进行混频得到 3.6 GHz 信号, 随后该 3.6 GHz 利用低噪声放大器放大后输入到 9 GHz 传递系统中。同理远端 2 与本地端 3 之间也需要一个 9 GHz 转 3.6 GHz 低噪声频率转换模块, 如图 7 (b) 所示。首先将远端 2 接收到的 9 GHz 标准频率信号, 利用一个谐波丰富的 9 分频器进行分频, 并利用 3.6 GHz 带通滤波器筛选出 3.6 GHz 谐波, 利用低噪声放大器放大后将 3.6 GHz 输入到第 3 段 9 GHz 光纤微波频率传递系统中。

两个低噪声频率转换模块的附加噪声属于系统的环外噪声, 不能被系统中的噪声补偿执行机构补偿掉。因此两个低噪声频率转换模块的附加噪声要尽可能的小, 否则将会对级联系统的传递稳定度造成很大的影响。为了使频率转换模块噪声尽可能低, 在设计中严格遵循了 4 个基本的设计原则: ① 避免大系数分频; ② 减少频率变换的次数; ③ 选用低噪声芯片; ④ 尽可能使变换模块小型化。每种低噪声频率转换模块我们均制作了两个, 并将同源的 10 GHz 或者 9 GHz 参考信号, 输入到频率转换模块中, 利用与 2 中相同的鉴相电压稳定度测量法测量输出 3.6 GHz 的频率稳定度, 如图 7 (b) 所示。



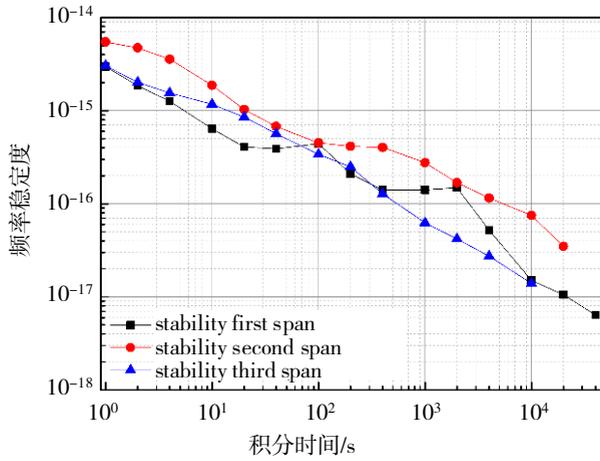
(a) 10 GHz 转 3.6 GHz 模块



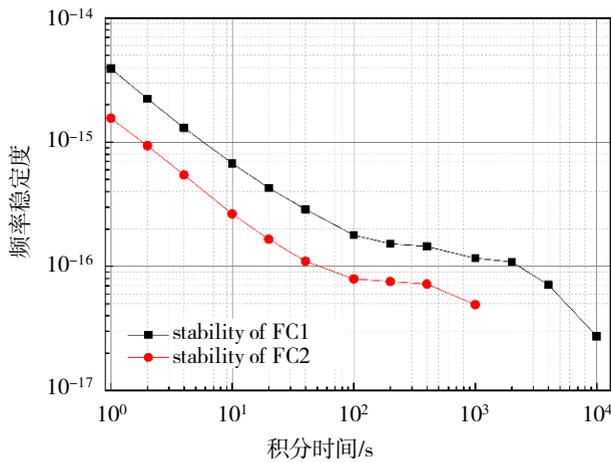
(b) 9 GHz 转 3.6 GHz 模块

图 7 低噪声频率转换模块

为了评估级联光纤微波频率传递系统的性能, 我们同样采用外差法测量法测试了级联系统的传递稳定度。我们在 300 km 级联传递系统稳定度进行测试, 也测量了级联传递系统中每个单段传递系统的传递稳定度, 如图 8 (a) 所示。第一段与第三段的短期传递稳定度都可以达到 4×10^{-15} @ 1 s 量级, 由于 3 个单段的传递设备的一致性不是很好, 造成三段传递稳定度曲线下斜率不一致, 第二段的传递实验中由于没有使用色散补偿光纤, 造成第二段传递的稳定度较差。10 ~ 3.6 GHz 低噪声频率转换模块 (low noise frequency conversion 1, FC1) 的稳定度达到 3.9×10^{-15} @ 1 s, 其稳定度主要受限于相对较多的频率变换次数。9 ~ 3.6 GHz 的低噪声频率转换模块 (low noise frequency conversion 2, FC2) 的稳定度为 1.5×10^{-15} @ 1 s 优于单段光纤微波频率传递系统。但由于实验室内的温度波动, 造成频率转换模块的稳定度曲线在 200 s 处出现变平。如图 8 (b) 所示。



(a) 单段传递系统的稳定度



(b) 低噪声频率转换模块稳定度

图 8 级联传递系统的传递稳定度

图 9 展示了测量的 300 km 级联的传递稳定度， 1.1×10^{-14} @ 1 s 和 6.8×10^{-18} @ 10^5 s (方块曲线)。

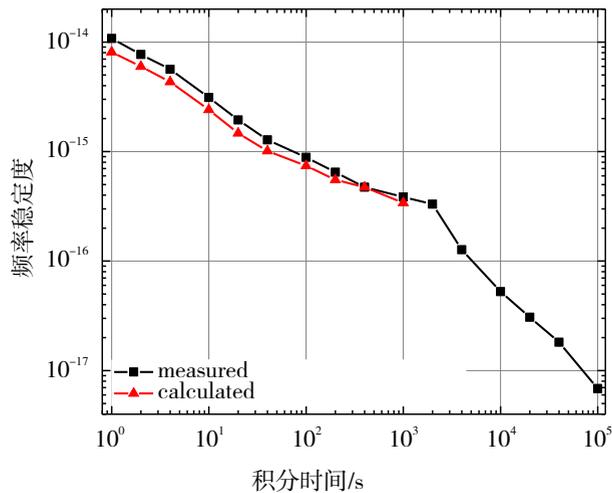


图 9 300 km 级联传递稳定度

根据级联传递稳定度与传递系统内各部分的稳定度关系：

$$\sigma_{cal} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_{fc1}^2 + \sigma_2^2 + \sigma_{fc2}^2 + \sigma_3^2}, \tag{3}$$

式(3)中, σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为各段传递稳定度, σ_{fc1} 、 σ_{fc2} 分别为两个低噪声频率转换模块的稳定度。我们利用测量的各部分的稳定度 σ , 计算级联的传递稳定度 σ_{ca1} (三角曲线)。计算所得的稳定度与测量稳定度很好的符合, 但由于单段传递系统的稳定度是远端解调信号相对于本段参考信号的稳定度。并没有考虑微波信号在级联系统各组成部分之间传递时的微波相噪恶化, 所以计算所得的级联稳定度略微优于测量的级联传递稳定度。

表 2 级联传递系统指标对比

研究机构	传递距离 /km	级联次数	稳定度 /@ 1 s	稳定度 /@ 10 ⁴ s	稳定度 /@ 1 d	测试频率 /GHz	参考文献
NICT	204	2	6×10^{-14}	2×10^{-16}	—	1	[20]
THU	145	3	1.3×10^{-14}	4.1×10^{-17}	—	0.1	[21]
SIOM	430	2	1.9×10^{-13}	1.3×10^{-16}	—	1	[22]
NTSC	300	3	1.1×10^{-14}	5.3×10^{-17}	6.8×10^{-18}	9	[24]

我们将近年来已报道的日本国家信息与通信研究院 (NICT)、清华大学 (THU) 和上海光学与精密机械研究所 (SIOM) 的级联传递研究成果总结在表 2 中。级联系统中每一级的传递频率为 10 GHz 或者 9 GHz 以保证鉴相分辨率, 每一级均采用不同频率的往返传递信号以保证系统对各种光纤链路条件的适应性。相比于光学相位补偿方案, 我们采用通用的 PDRO 作为链路噪声的补偿器件, 可以使实验结构更加简单, 成本更加低廉, 非常适合地基授时系统中大规模光纤微波频率传递网络建设的工程应用。

4 结论

本文介绍了中国科学院国家授时中心在光纤微波频率传递方面的进展。利用研制的 10 GHz 光纤微波频率传递设备在 112 km 实地光纤上进行实验, 获得了 4.2×10^{-15} @1 s 和 1.6×10^{-18} @1 d 的传递稳定度。基于同样的实验原理, 搭建了 3 套微波频率传递系统, 并在 300 km 的实验室光纤上进行了级联传递实验, 获得了 1.1×10^{-14} @1 s 和 6.8×10^{-18} @10⁵ s。传递系统可以很好地避免链路上寄生反射的影响, 具有较好的光纤链路适应性, 可以在连接点较多的、衰减较大的复杂光纤链路上开展传递实验, 可靠性较高。相比于光学相位补偿方案, 我们的传递系统采用微波相位补偿方案, 传递系统结构简单, 便于大规模的工程应用, 高精度地基授时系统中光纤微波频率传递分系统的建设工作将以上述实验结果为基础展开。

参考文献:

- [1] KARSHENBOIM S G. Some possibilities for laboratory searches for variations of fundamental constants[J]. Canadian Journal of Physics, 2012, 78(7): 639-678.
- [2] HUANG S H, TJOELKER R L. All-Photonic Link for High-Performance Antenna Arraying[R]. IPN Progress Report 42-167, 2006.
- [3] HE Y, BALDWIN K, ORR B J, et al. Long-distance telecom-fiber transfer of a radio-frequency reference for radio astronomy[J]. Optica, 2018, 5(2): 138-146.
- [4] YE J, PENG J L, JASON J R, et al. Delivery of high-stability optical and microwave frequency standards over an optical fiber network[J]. Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics, 2003, 20(7): 1459-1467.
- [5] YAO K, YANG X H, QIN W J, et al. Method of precise common-view frequency transfer based on BeiDou GEO satellite[C] // 2014 IEEE International Frequency Control Symposium, Taipei: IEEE, 2014.

- [6] FUJIEDA M, GOTOH T, AMAGAI J. Advanced two-way satellite frequency transfer by carrier-phase and carrier-frequency measurements[J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2016, 723(1): 012036.
- [7] FUJIEDA M, GOTOH T, NAKAGAWA F, et al. Carrier-phase-based two-way satellite time and frequency transfer[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control*, 2012, 59(12): 2625-2630.
- [8] SLIWCZYNSKI L, KREHLIK P, LIPINSKI M, et al. Frequency distribution in delay-stabilized optical DWDM network over the distance of 3 000 km[C] // *Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium & the European Frequency and Time Forum*, Denver: IEEE, 2015.
- [9] CANTIN E, LOPEZ O, KLEIN A A, et al. REFIMEVE+: Optical frequency dissemination over $2 \times 1\,300$ km of a telecom network[C] // *2019 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum*, Orlando: IEEE, 2019.
- [10] CALONICO D, BERTACCO E K, CALOSSO C E, et al. Coherent optical frequency transfer at $5e-19$ over a doubled 642 km fiber link[J]. *Applied Physics B*, 2014, 117(3): 978-986.
- [11] DROSTE S, OZIMEK F, UDEM T, et al. Optical-frequency transfer over a single-span 1 840 km fiber link[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 111(11): 110801.
- [12] CALONICO D, BERTACCO E K, CALOSSO C E, et al. High-accuracy coherent optical frequency transfer over a doubled 642 km fiber link[J]. *Applied Physics B*, 2014, 117(3): 979-986.
- [13] LOPEZ O, KLEIN A A, DAUSSY C, et al. 86 km optical link with a resolution of 2×10^{-18} for RF frequency transfer[J]. *European Physical Journal D*, 2007, 48(1): 35-41.
- [14] 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.
- [15] MARRA G, SLAVIK R, HELEN S M, et al. High-resolution microwave frequency transfer over an 86 km-long optical fiber network using a mode-locked laser[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(4): 511-513.
- [16] NARBONNEAU F, MICHEL L, BIZE S, et al. High resolution frequency standard dissemination via optical fiber metropolitan network[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77(6): 64701-64701.
- [17] LOPEZ O, KLEIN A A, LOURS M, et al. High-resolution microwave frequency dissemination on an 86 km urban optical link[J]. *Applied Physics B*, 2010, 98(4): 723-727.
- [18] 赵粹臣, 赵文宇, 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): 33-39.
- [19] WANG B, GAO C, CHEN W L, et al. Precise and continuous time and frequency synchronization at the 5×10^{-19} accuracy level[J]. *Scientific Reports*, 2012, 2: 556.
- [20] FUJIEDA M, KUMAGAI M, NAGANO S. Coherent microwave transfer over a 204-km telecom fiber link by a cascaded system[J]. *IEEE Transactions Ultrasonics Ferroelectrics Frequency Control*, 2010, 57(1): 168-174.
- [21] GAO C, WANG B, ZHU X, et al. Dissemination stability and phase noise characteristics in a cascaded, fiber-based long-haul radio frequency dissemination network[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(9): 16498.
- [22] 刘琴, 韩圣龙, 王家亮, 等. 采用级联方式实现 430 km 高精度频率传递[J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 205-209.
- [23] 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.
- [24] XUE W X, ZHAO W Y, QUAN H L, et al. Cascaded microwave frequency transfer over 300-km fiber link with instability at the 10^{-18} [J]. *Level Remote Sensing*, 2021, 13(11): 2182.