文章编号:1674-2869(2025)04-0442-06

基于级联被动补偿模块的微波频率信号传递方法

张雪岩,吴 舜*
光学信息与模式识别湖北省重点实验室(武汉工程大学),湖北 武汉 430205

摘 要:针对长距离光纤链路微波频率传递过程中出现的补偿带宽限制、结构复杂和成本高等问题,提出了一种基于级联被动补偿模块实现长距离微波频率信号传递的方法。通过光往返传递提取光纤链路相位噪声,利用级联被动补偿模块得到相位噪声预补偿信号,对经过预补偿的微波频率信号进行级联传递,最终实现微波频率信号的长距离传递。在(100+100) km两级级联光纤链路中,传输6.4 GHz微波频率信号的仿真结果表明,采样时间为1和1 000 s时,信号的频率传输稳定度分别为1.35×10^{-14}和1.24×10^{-17}。该结果比直接传递的频率传输稳定度提高了3.9倍。多级级联被动补偿的理论计算结果表明,相邻级联间频率传输稳定度呈现$\sqrt{N+1}/\sqrt{N}$倍的关系,其中N为级联的总级数。本文提出的级联被动补偿模块具有结构简单、补偿速度快和鲁棒性等特点,可以在光纤链路中多级添加,为长距离微波频率信号传递提供了便利和理论指导。

关键词:微波频率传递;光纤传递;级联频率传递;被动补偿
中图分类号:TN24 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202407020

A microwave frequency signal transmission method based on cascaded passive compensation module

ZHANG Xueyan, *WU Shun**
Hubei Key Laboratory of Optical Information and Pattern Recognition, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Abstract: A method based on cascaded passive compensation modules for implementing long-distance microwave frequency signal transmission was proposed to address the problems of compensation bandwidth limitation, complex structure, and high cost that occur during microwave frequency transmission over long-distance fiber-optic links. The phase noise of the fiber-optic link was extracted through optical round-trip transmission, and a phase noise pre-compensation signal was obtained using the cascaded passive compensation module. The pre-compensated microwave frequency signal was cascaded for transmission, ultimately achieving its long-distance transmission. Simulation results of a 6.4 GHz microwave frequency signal transmitted over a two-stage cascaded fiber link of 100 km+100 km indicated that the frequency transmission stability is 1.35×10^{-14} and 1.24×10^{-17} at sampling times of 1 and 1 000 s, respectively, which means this method improves the frequency transmission stability by 3.9 times compared to direct transmission. Theoretical calculations of multistage cascaded passive compensation revealed that the proportional relationship of frequency transmission stability between adjacent cascades is $\sqrt{N+1}/\sqrt{N}$, where N is the total number of stages in the cascades. The proposed module has the characteristics of simple structure, fast compensation speed, and robustness, which can be added at multiple stages in the fiber link, providing convenience and theoretical guidance for long-distance microwave frequency signal transmission.

Keywords: microwave frequency transmission; fiber optic transmission; cascading frequency transmission; passive compensation

收稿日期:2024-07-22
基金项目:武汉工程大学校内基金(22QD01)
作者简介:张雪岩,硕士研究生。Email:1577859358@qq.com
***通信作者**:吴 舜,博士,特聘教授。Email:wushun@wit.edu.cn
引文格式:张雪岩,吴舜. 基于级联被动补偿模块的微波频率信号传递方法[J]. 武汉工程大学学报,2025,47(4):442-447.

长距离多址微波频率信号的稳定传递对科学技术的发展和应用起到了重要的作用，射电天文学、原子钟和全球导航卫星系统，均包括北斗、全球定位系统（global positioning system，GPS）、Galileo 和 Gloness，这些基础科学研究和导航定位领域等都需要用到高稳定的微波频率信号。基于卫星的传统射频传递方法[4-5]因为受到外界大气环境因素的干扰，传输稳定性不能满足高稳定微波频率信号的传递要求。基于光纤的射频传递方法因为具有抗干扰能力强、高可靠性、低损耗、高带宽等特点，而受到各国学者的广泛关注[6-8]。根据补偿方法的不同，基于光纤的射频传递方法可分为主动补偿和被动补偿两类。主动补偿[9-11]方法通过锁相环（phase locked loop，PLL）等一系列电子设备进行伺服补偿。被动补偿[12-14]方法不需要复杂的 PLL 结构，仅通过混频即可提取出补偿信号进行补偿。因此相对于主动补偿来说，被动补偿因具有结构简单、成本低、补偿速度快和鲁棒性等优点而得到广泛研究和应用，各种基于光纤的被动补偿射频传递方法被提出，实验证明被动补偿射频传递方法已经能够满足高稳定微波频率信号的传递要求[13]。

目前，如何实现长距离光纤微波频率信号的传递仍然是一个极具挑战的问题。随着传输光纤长度的增加，补偿带宽 f_c 减小[$f_c<1/(4\tau)$，τ 是光载波在光纤链路中传递的时间][15-16]，补偿方法的后期优化将变得十分困难。针对上述问题，研究人员提出级联补偿的方法[17]，其中每级光纤链路引起的相位噪音都能被独立的补偿装置所补偿，有效解决了长距离光纤链路频率传输稳定度差的问题。例如，Fujieda 等[9]采用 PLL 主动补偿的方法，通过二级级联在 204 km 城市实地光纤链路上实现了射频（radio frequency，RF）信号的长距离传递；Gao 等[10]采用 PLL 主动补偿的方法，在（50+50+45）km 的 3 段缠绕光纤上实现了三级级联射频传递；Li 等[17]采用 PLL 主动补偿的方法，利用多址中继站实现了 540 km 二级级联光纤链路上的长距离 RF 信号传递；Xue 等[11]采用 PLL 主动补偿的方法，演示了由 5 段缠绕光纤组成的 500 km 五级级联光纤链路上的微波频率信号的传递。随着科学技术的快速发展，更多行业需要用到高稳定原子钟频率信号[18-19]，因此，对长距离微波频率信号传递的需求日益增加。但是，现有的级联传递方法都是基于主动补偿，存在补偿带宽限制和补偿装置成本高昂等问题。如何实现结构简单、成本低廉的长距离微波频率信号传递，是一个亟待解决的技术问题。

本文提出了一种基于级联被动补偿模块实现长距离微波频率信号传递的方法，利用 Optisystem 光学仿真软件进行仿真研究。仿真结果表明，基于光纤的两级级联被动补偿微波频率信号传递方法在远程端可以获得理想的频率传输稳定度，能够满足当前原子钟的频率传递要求，给未来采用被动补偿方式进行长距离微波频率信号传递的实验提供了理论指导。

1　长距离级联被动补偿微波频率信号传递

1.1　实验原理

长距离级联被动补偿微波频率信号传递的原理图如图 1 所示。

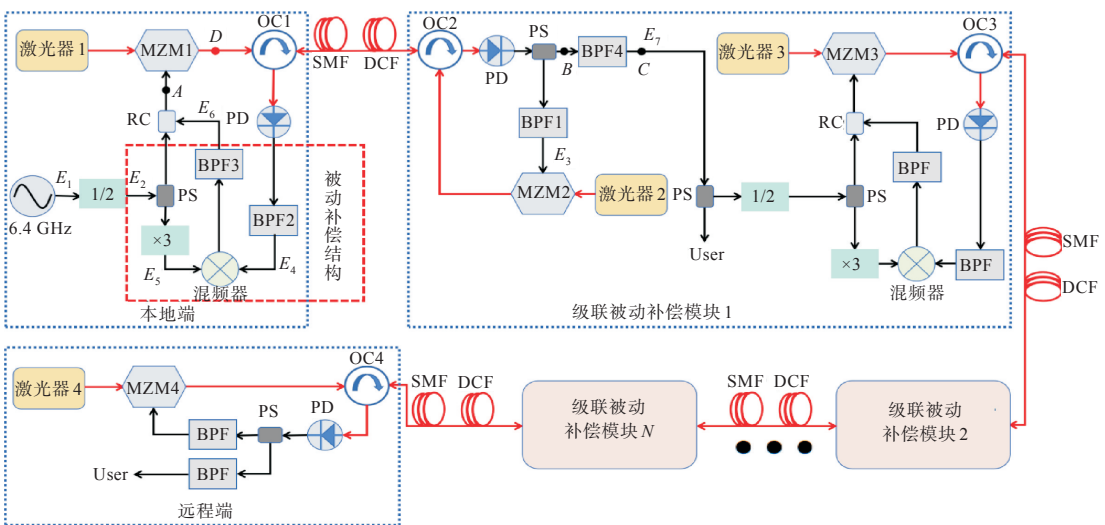

图 1　长距离级联被动补偿微波频率信号传递原理图

Fig. 1　Schematic of long-distance cascaded passive compensation microwave frequency signal transmission

在本地端发射的微波频率信号E_1可表示为：

$$E_1 = \cos(\omega_1 t + \phi_1) \tag{1}$$

其中，ϕ_1和ω_1分别为微波频率信号E_1的初始相位和初始频率。

微波频率信号E_1经过二分频后得到微波频率信号E_2，可表示为：

$$E_2 = \cos(\frac{1}{2}\omega_1 t + \frac{1}{2}\phi_1) \tag{2}$$

微波频率信号E_2通过功率分配器(power splitter，PS)分成两束，其中一束信号依次经过射频组合器(radio-frequency combiner，RC)和马赫-曾德尔调制器1(Mach-Zehnder modulator 1，MZM1)将微波频率信号E_2调制到激光器1发出的激光载波上。被MZM1调制后的激光载波经过光环形器1(optical circulator 1，OC1)进入光纤链路，光纤链路由一段80 km长的单模光纤(single-mode fiber，SMF)和20 km长的色散补偿光纤(dispersion compensating fiber，DCF)组成，再经过OC2后输入光电探测器(photoelectric detector，PD)，在PD上进行拍频，拍频出来的信号经过PS分成两束功率相等的微波频率信号，一束通过中心频率为3.2 GHz的带通滤波器1(bandpass filter 1，BPF1)得到微波频率信号E_3，可表示为：

$$E_3 = \cos(\frac{1}{2}\omega_1 t + \frac{1}{2}\phi_1 + \phi_a) \tag{3}$$

其中，ϕ_a为微波频率信号E_3在光纤链路中引入的相位。

将BPF1过滤后的信号通过MZM2调制到激光器2发出的光载波上。返回的激光载波输入到OC2后再次进入光纤链路，经过OC1输出，在PD上进行拍频，拍频后的信号经过中心频率为3.2 GHz的BPF2进行过滤得到微波频率信号E_4，可表示为：

$$E_4 = \cos(\frac{1}{2}\omega_1 t + \frac{1}{2}\phi_1 + \phi_a + \phi_b) \tag{4}$$

其中，ϕ_b为微波频率信号E_4在光纤链路中引入的相位。在短时间内，外界温度变化是相同的，因此引入的相位也相同，即$\phi_a = \phi_b$。

微波频率信号E_2经过PS分束后进行三倍频，再输入到混频器的一端得到微波频率信号E_5，可表示为：

$$E_5 = \cos(\frac{3}{2}\omega_1 t + \frac{3}{2}\phi_1) \tag{5}$$

将BPF2过滤出来的微波频率信号E_4与三倍频后的微波频率信号E_5进行混频，经过中心频率为6.4 GHz的BPF3过滤出微波频率信号E_6，可表示为：

$$E_6 = \cos(\omega_1 t + \phi_1 - \phi_a - \phi_b) \tag{6}$$

混频出来的微波频率信号E_6作为预补偿信号，经过RC后，在A点获得预补偿信号和探测信号混合后所产生的混合频率信号。再通过MZM1将混合频率信号调制到激光器1发出的激光载波上，在D点获得调制后的激光载波。被MZM1调制后的激光载波通过OC1进入光纤链路，再经过OC2后输入到PD上，在PD上进行拍频，在B点获得解调恢复的频率信号。拍频后的信号通过中心频率为6.4 GHz的BPF4在C点得到微波频率信号E_7，可表示为

$$E_7 = \cos(\omega_1 t + \phi_1 - \phi_a - \phi_b + \phi_c) \tag{7}$$

其中，ϕ_c为微波频率信号E_7在光纤链路中引入的相位。在短时间内，光信号向前传递和向后传递引入的时延相同，所以$\phi_a = \phi_b = \phi_c/2$，式(7)可改写为：

$$E_7 = \cos(\omega_1 t + \phi_1 - \phi_a - \phi_b + \phi_c) = \cos(\omega_1 t + \phi_1) = E_1 \tag{8}$$

本地端发射的稳定微波频率信号E_1被传递到级联被动补偿模块1中，将微波频率信号E_1作为下一级的输入信号在长距离光纤链路中进行传递，在远程端得到了稳定的微波频率信号E_1，最终实现了微波频率信号E_1的长距离稳定传递。

1.2 仿真参数设计

仿真中使用实际测量的光学和电学参数模拟的双驱动MZM，2个干涉臂上的偏置电压分别设置为−2.8和−1.1 V，MZM内部2个干涉臂的光功率分束比值为1.3。每一级光纤链路长度为100 km，其中：普通SMF长度为80 km，其色散系数设置为16.75 ps/(nm·km)，光功率衰减设置为0.2 dB/km；DCF的长度设置为20 km，其色散系数设置为−67 ps/(nm·km)；光循环器在理想状态下的光功率插入损耗设置为0 dB；中心频率分别为3.2和6.4 GHz的BPF的3 dB带宽均设置为30 MHz；低通滤波器的截止频率设置为1 000 Hz；混频器使用电乘法器，即将两个电信号相乘；PD的光响应度设置为1 A/W，暗电流设置为10 nA。在本地端设置激光器1的波长为1 549 nm，在级联被动补偿模块1中设置激光器2和激光器3的波长分别为1 550和1 549 nm，在远程端设置激光器4的波长为1 550 nm。

为了模拟外界环境中温度变化对光纤链路的影响，仿真时，将如图2所示随温度变化的时延波动数据导入光纤中，在1 h内引入约1.25 ns的时延。温度变化速度相对于光纤中信号传输的速度

要缓慢得多，因此，前向传输链路和后向传输链路中导入的时延波动数据近似相同。

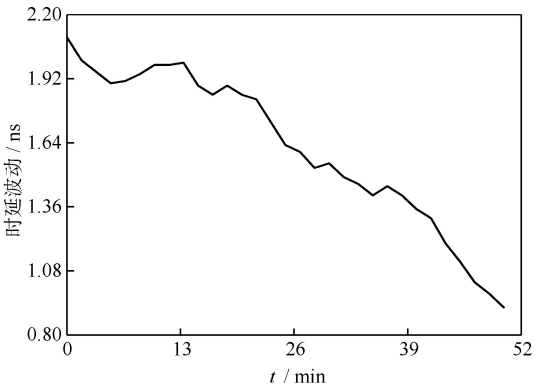

图2　随时间变化的时延波动数据图

Fig. 2　Time-dependent time delay fluctuation data graph

1.3　仿真流程

（100+100）km两级级联的长距离被动补偿微波频率信号传递的仿真流程为：首先，根据微波频率传递原理搭建仿真模型；再根据导入的时延波动数据量设置合理的仿真迭代次数；然后，在仿真时，将随温度变化缓慢减小的时延波动数据导入光纤中；最后，仿真运行微波频率传递模型，并通过多次迭代提取相位电压数据。经过上述流程处理，将相位电压数据转换成时延数据，使用stable32软件计算仿真模型的频率传输稳定度。

2　结果与讨论

图3给出了图1中*A*点、*B*点和*C*点处的频谱图和*D*点处的光谱图，频谱分辨率带宽为10 MHz，光谱分辨率带宽为0.001 nm。图3(a)中可以同时看到6.4 GHz的预补偿信号和3.2 GHz的探测信号。图3(b)中可以看到在PD上进行解调恢复的频率信号有很多不需要的频率边带信号，且频率间隔为3.2 GHz。将PD上经过解调恢复的频率信号，通过中心频率为6.4 GHz的BPF4进行过滤，滤出经过相位补偿的6.4 GHz微波频率信号，如图3(c)所示，表明在远程端得到了稳定的6.4 GHz微波频率信号。图3(d)中可以看到激光器1发出的激光载波经过MZM1调制后会产生很多不同频率成分的边带信号，相邻频率边带间隔为3.2 GHz。

为了评估该微波频率信号传递方法的补偿性能，提取远程端解调得到的6.4 GHz频率信号和本地端的6.4 GHz参考频率信号之间的误差信号进行相位对比分析，误差信号经过低通滤波器（截止频率1 000 Hz）后，对误差信号的电压进行记录、计算并转换为时延。对（100+100）km两级级联被动补偿和200 km自由运行微波频率信号传递方法均导入相同的1.25 ns的时延波动，得到两者的时延对比图，如图4所示。自由运行链路的相位波动更大，峰峰值为1 ps。级联被动补偿链路的相位波动更加稳定，峰峰值为0.05 ps，表明（100+100）km两级级联被动补偿比200 km自由运行微波频率信号传递方法稳定了20倍。

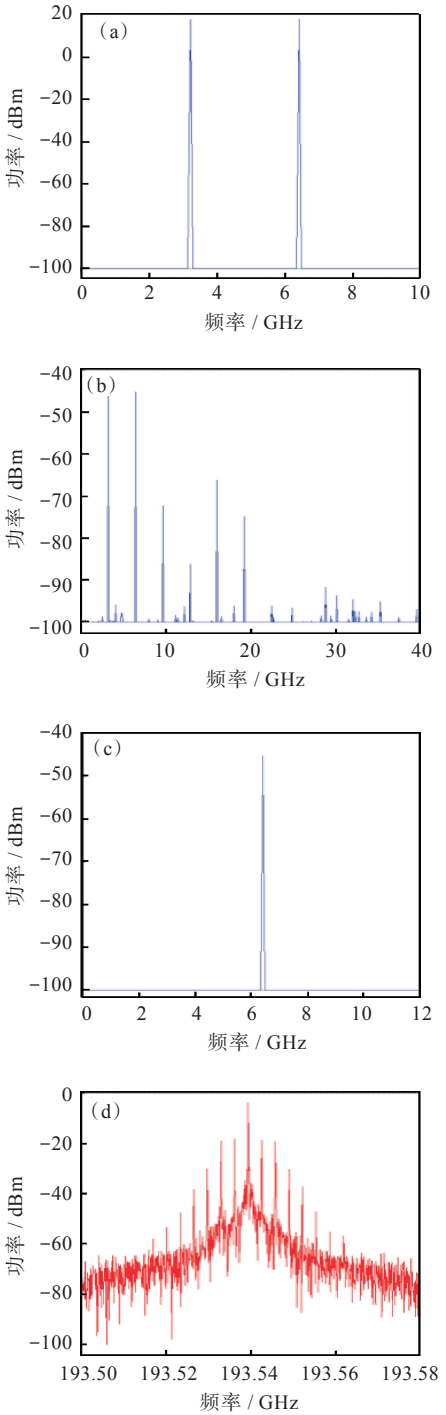

图3　图1中*A*点(a)、*B*点(b)和*C*点(c)的频谱图及*D*点的光谱图(d)

Fig. 3　Frequency spectrum at points *A*(a), *B*(b), and *C*(c) and spectrum at point *D*(d) in Figure 1

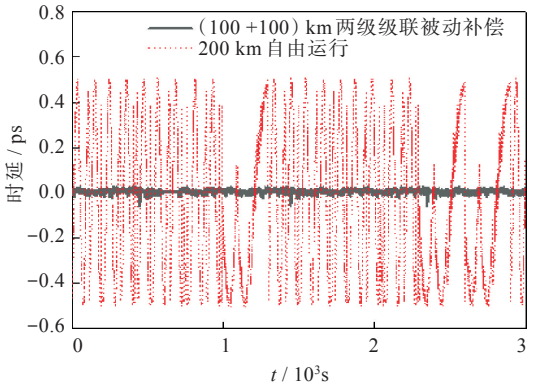

图4 两种微波频率信号传递方法的时延对比图

Fig. 4 Delay comparison of two microwave frequency signal transmission methods

为了对比自由运行、直接传递和级联被动补偿方法的频率传递性能，记录并分析了3种情况下的频率传输稳定度，如图5所示。直接传递和级联被动补偿的装置结构相同，均为被动补偿结构，直接传递是在200 km光纤链路中进行微波频率信号的传递，不含图1中的级联被动补偿模块。200 km自由运行仿真光纤链路的短期稳定度在1 s时为1.21×10^{-13}，长期稳定度在1 000 s时为8.2×10^{-16}。200 km直接传递仿真光纤链路的短期稳定度在1 s时为5.25×10^{-14}，长期稳定度在1 000 s时为6.05×10^{-17}。(100+100) km两级级联被动补偿仿真光纤链路的短期稳定度在1 s时为1.35×10^{-14}，和自由运行以及直接传递相比，分别提高了9.0和3.9倍。长期稳定度在1 000 s时为1.24×10^{-17}，和自由运行以及直接传递相比，分别提高了66.7和4.9倍。影响200 km光纤链路频率传输稳定度的主要因素是补偿带宽限制，随着光纤链路长度增加，补偿带宽限制也将增加，使频率传输稳定度变差。在进行长距离光纤链路微波频率信号传递时，级联被动补偿方法有效提升了频率传输稳定度。(100+100) km两级级联被动补偿方法的频率传输稳定度已经能够满足当前稳定原子钟的传递要求，为未来采用级联被动补偿方法进行长距离级联实验的研究提供了理论指导。

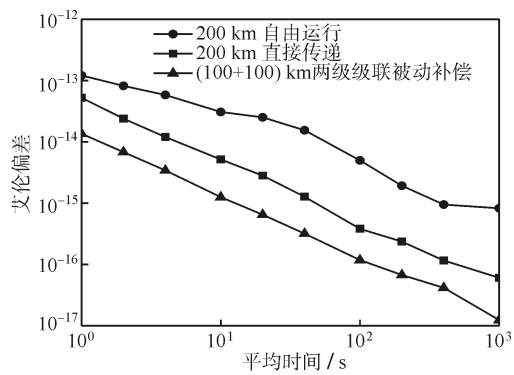

图5 不同微波频率信号传递方法的频率传输稳定度

Fig. 5 Frequency transmission stability of microwave frequency signal transmission methods

根据公式$\sigma_{\mathrm{T}}^2=\sum_{i=1}^{N}\sigma_i^2$，对多级级联被动补偿方法的频率传输稳定度进行理论计算，其中σ_i是第i级的频率传输稳定度，N为级联的总级数，σ_{T}是总频率传输稳定度[10]。基于级联被动补偿模块实现长距离微波频率信号传递的方法中，每一级光纤链路的长度均为100 km，因此每一级的频率传输稳定度近似相等，即

$$\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3=\cdots=\sigma_N \tag{9}$$

根据上述理论得到二级、三级和四级级联被动补偿方法的频率传输稳定度，如图6所示。随着总级数N的增加，相邻级联间频率传输稳定度呈现$\sqrt{N+1}/\sqrt{N}$倍的关系，这种关系会逐渐趋于1，表明频率传输稳定度不会随着总级数N的增加而急剧恶化。

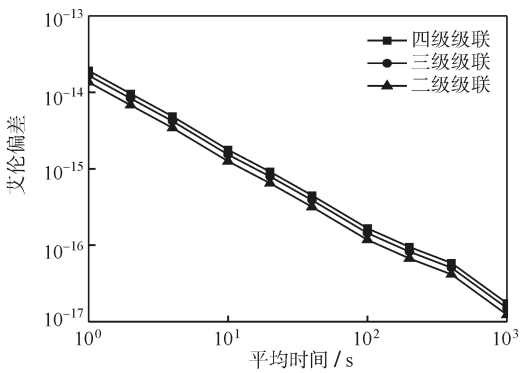

图6 多级级联被动补偿方法的频率传输稳定度

Fig. 6 Frequency transmission stability of a multi-stage cascaded passive compensation method

3 结 论

本文提出了一种基于级联被动补偿模块实现长距离微波频率信号传递的方法，具有结构简单、补偿速度快和鲁棒性等特点，并且具有独立补偿每个光纤子链路噪声的能力，可提供多址频率信号传递功能。和直接传递相比，有效地将长距离光纤链路的频率传输稳定度在1 s时提高了3.9倍。理论计算显示，当总级数N较大时，级联频率传输稳定度也将趋于稳定。在仿真中，通过(100+100) km两级级联光纤链路实现了6.4 GHz微波频率信号的传输，采样时间为1和1 000 s时，信号的频率传输稳定度分别为1.35×10^{-14}和1.24×10^{-17}。通过在主光纤链路上添加相同的级联被动

补偿模块,可有望实现长距离微波频率信号的稳定传递,给未来采用被动补偿方式进行长距离微波频率信号传递的实验提供了理论指导。

参考文献

[1] RAY J, SENIOR K. Geodetic techniques for time and frequency comparisons using GPS phase and code measurements [J]. Metrologia, 2005,42(4):215-232.

[2] MCKENZIE K, SHADDOCK D A, MCCLELLAND D E, et al. Experimental demonstration of a squeezing enhanced power recycled Michelson interferometer for gravitational wave detection [J]. Physical Review Letters, 2002, 88(23): 231102.

[3] CALHOUN M, HUANG S H, TJOELKER R L. Stable photonic links for frequency and time transfer in the deep-space network and antenna arrays [J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(10):1931-1946.

[4] PIESTER D, BAUCH A, BREAKIRON L, et al. Time transfer with nanosecond accuracy for the realization of international atomic time [J]. Metrologia, 2008, 45(2): 185-198.

[5] TSENG W H, LIN S Y, FENG K M, et al. Improving TWSTFT short-term stability by network time transfer [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2010, 57(1): 161-167.

[6] YU L Q, WANG R, LU L, et al. Stable radio frequency dissemination by simple hybrid frequency modulation scheme [J]. Optics Letters, 2014, 39(18): 5255-5258.

[7] KREHLIK P, ŚLIWCZYŃSKI Ł, BUCZEK Ł, et al. ELSTAB-fiber optic time and frequency distribution technology: a general characterization and fundamental limits [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2016, 63(7): 993-1004.

[8] YU L Q, LU L, SHI L, et al. Simultaneous time and frequency transfer over 100 km optical fiber based on sub-carrier modulation [J]. Optics Communications, 2018, 427: 335-340.

[9] FUJIEDA M, KUMAGAI M, NAGANO S. Coherent microwave transfer over a 204-km telecom fiber link by a cascaded system [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2010, 57(1): 168-174.

[10] 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): 093111.

[11] XUE W X, QUAN H L, ZHAO W Y, et al. Microwave frequency transfer over a 500-km cascaded fiber link using tracking filter [J]. Optics and Laser Technology, 2023, 163: 109327.

[12] GUO W P, GAO H, LI X Y, et al. Research on the impact of temperature variation on stability of optical fiber frequency transfer system [J]. Optical Engineering, 2022, 61(5): 056105.

[13] WEI H, LU L, YU L Q, et al. Frequency crosstalk on fiber-optic radio frequency transfer under fiber temperature variation [J]. Optical Engineering, 2019, 58(6): 066117.

[14] LIU C X, JIANG T W, WANG H Y, et al. Phase-modulation-based stable radio frequency transmission via 125 km fiber optic link [J]. IEEE Photonics Journal, 2023, 15(3): 7100605.

[15] NEWBURY N R, WILLIAMS P A, SWANN W C. Coherent transfer of an optical carrier over 251 km [J]. Optics Letters, 2007, 32(21): 3056-3058.

[16] 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. Optical Physics, 2008, 25(8): 1284-1293.

[17] LI Q, HU L, ZHANG J B, et al. Multiple-access relay stations for long-haul fiber-optic radio frequency transfer [J]. Optics Express, 2022, 30(11): 18402-18414.

[18] 李文联,雷玉洁,金璐,等.全球导航定位系统接收机的跟踪环路带宽设计[J].武汉工程大学学报,2013,35(3):66-69.

[19] HAN J Y, LIU C X, YU S, et al. Stable radio frequency dissemination-based on passive method by avoiding second harmonic distortion [J]. Optical Engineering, 2019, 58(4): 046101.

本文编辑:霍淑利