

光学学报

多址光纤微波频率传递技术研究

鱼少少^{1,2}, 全洪雷^{1,2}, 赵文字^{1,2}, 薛文祥³, 王鑫^{1,2}, 张首刚^{1,2*}¹中国科学院国家授时中心中国科学院时间频率基准重点实验室, 陕西 西安 710600;²中国科学院大学, 北京 100049;³西安邮电大学通信与信息工程学院, 陕西 西安 710121

摘要 本文提出一种多址光纤微波频率传递技术,可以实现一个主端到多个从端的系统构架,并且支持信号中途下载功能,增强了光纤微波频率传递技术的应用范围。本文系统方案主从端采用不同的激光波长,消除了信号光寄生反射和背向散射的影响。经实验验证,多址光纤微波传递系统稳定度分别达到 $3.5 \times 10^{-14}/s$ 和 $1.2 \times 10^{-17}/10^5 s$;中途下载端的稳定度分别为 $4.1 \times 10^{-14}/s$ 和 $6.5 \times 10^{-17}/10^5 s$ 。多址光纤微波频率传递系统所实现的指标能够满足目前各种应用对微波原子频标的远距离传输需求,具有广阔的应用前景。

关键词 光纤微波; 频率传递; 微波频率; 锁相技术

中图分类号 TN919.11

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231680

1 引言

光纤微波频率传递技术基于回环法默认往返通道噪声对称,对光纤噪声进行探测和抑制,在使用既成的通信光纤链路条件下频率传输稳定度可以达到 $10^{-18}/d \sim 10^{-19}/d$,满足当前微波原子基准频标的远程传递和比对,在射电望远镜阵列^[1-3]、时间和频率同步网络^[4-5]、远程原子钟实时比较及其协调^[6-7]、天文学与基础科学^[8-9]等领域具有广阔的应用前景。

在光纤微波频率传递系统所使用的补偿方案主要分为两种:光学相位补偿方案^[10-12]和电学相位补偿方案^[13-15]。目前绝大多数方案为点对点的主从站传输结构,而在许多应用场景中,需要将一个基准频率源传递给多个用户(多址),甚至在传输光纤链路中增加中途下载点,比如平方公里阵(SKA)射电望远镜阵列、甚长基线干涉测量(VLBI),以及在同一地区的各个实验室之间的频率基准比对等应用。清华大学在2015年进行了光纤微波传递设备的中途下载并且之后设计了一发多收的光纤微波频率传递系统^[16];上海交通大学在2016年进行了被动噪声补偿的多路地址下载研究^[17];姜瑶等^[18]设计了基于被动补偿方法的多链路分布稳相传输及单链路分布稳相传输的实验。

中国科学院国家授时中心承担的高精度地基授时项目,包含千公里级的光纤微波频率传递网络建设内

容,其中使用了中国科学院国家授时中心特有的电学相位补偿传输方案。该项目出于增强高精度地基授时系统的区域服务能力的目的,构建未来所需的本地频率分发网络作为骨干传输网的补充,设计一套和已有系统兼容的多址传输和中途下载设备方案,使骨干网中的标准频率信号到达城市节点百公里范围的用户端,完成城市节点频率信号分发任务。

本文首先介绍了多址光纤微波传递和中途下载原理,在实验室搭建了光纤卷轴实验装置,分别实现了多址光纤微波频率传递和中途下载功能,得到多址光纤微波频率传递的稳定度分别为 $3.5 \times 10^{-14}/s$ 和 $1.2 \times 10^{-17}/10^5 s$,中途下载的稳定度分别为 $4.1 \times 10^{-14}/s$ 和 $6.5 \times 10^{-17}/10^5 s$ 。

2 基本原理

多址光纤微波频率传递技术的系统框图如图1所示,图中TX为公共发射端,RX1~RXN为多个接收端,即为多个地址(多址)。在发射端TX内,参考信号通过马赫-曾德尔调制器(MZM),以外调制的方式调制到激光载波上;然后利用光纤分束器,将信号光分为N路,分别传输给N个地址。本文中多址光纤频率传递技术方案主要有两方面的特点:第一,其链路噪声补偿在接收端中实现,以电学相位补偿方式实现,用于补偿光纤链路由于温度、应力等外界环境变化带来的噪声扰动;第二,传输系统中的色散补偿光纤也置于接收

收稿日期: 2023-10-20; 修回日期: 2023-11-15; 录用日期: 2023-12-13; 网络首发日期: 2023-12-23

基金项目: 中国科学院西部之光基金(29202082)

通信作者: *szhang@ntsc.ac.cn

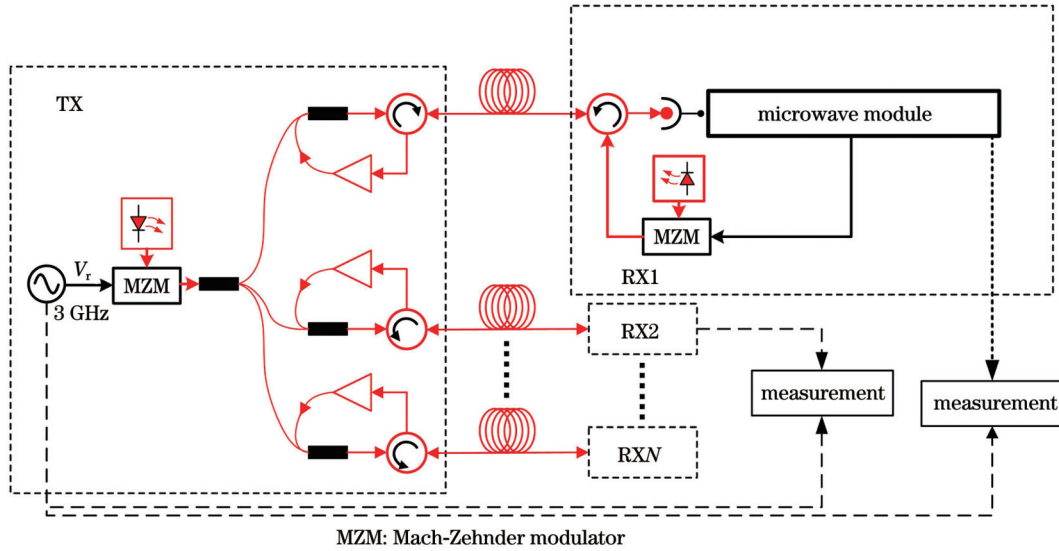


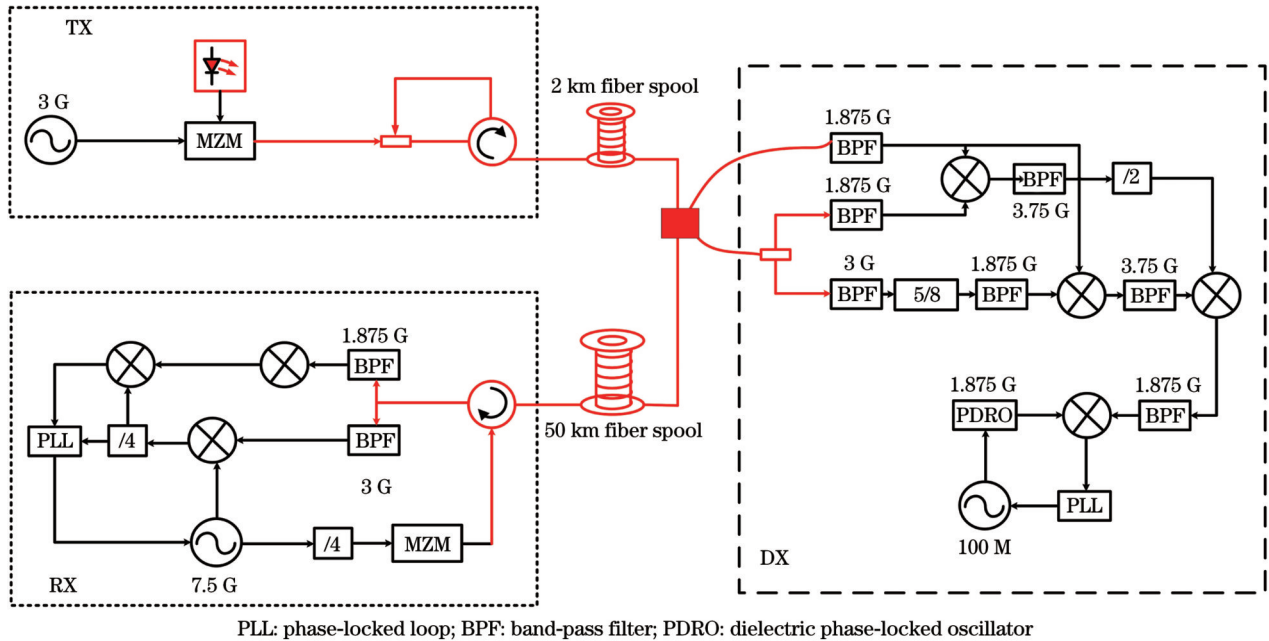
图 1 多址光纤微波频率传递系统示意图

Fig. 1 Diagram of multi-access fiber optic microwave frequency transmission system

端,用于补偿光纤链路中的色散影响。通过以上方案,可以在简化发射端微波结构的同时很方便地实现对链路接收端的增加而不影响之前已有的光纤传输链路。此外,也可以在已有的光纤链路中进行微波信号的下载应用,拓宽了光纤微波频率传输的拓扑图,使光纤微

波频率传递可以得到更加广泛的应用。

为了进一步分析多址光纤微波频率传递原理以及中途下载的可行性,仅采用一个接收端进行原理分析,如图 2 所示,同时,图 2 也是实验室多址光纤微波频率传输的实验图。



PLL: phase-locked loop; BPF: band-pass filter; PDRO: dielectric phase-locked oscillator

图 2 光纤微波频率传递原理与实验图

Fig. 2 Principle and experimental diagram of fiber optic microwave frequency transmission

在图 2 中,发射端只有一个参考信号 V_r ,其频率为 3 GHz,采用 MZM 将 V_r 调制到载波激光上,采用光纤耦合器耦合进光纤链路中传输至接收端。由于信号幅值对微波信号的传递稳定度没有影响,因此在接下来的公式分析中忽略信号的幅值。设参考信号为

$$V_r = \sin(\omega_r t + \varphi_r), \quad (1)$$

式中: ω_r 为参考信号的频率; φ_r 为参考信号的相位。则经过链路后接收到的信号为

$$V_r' = \sin(\omega_r t + \varphi_r + 3\varphi_p), \quad (2)$$

式中, φ_p 为 1 GHz 的微波信号经过光纤链路引入的相位波动。

在接收端,由锁相在 100 MHz 恒温晶振(OCXO)

的介质锁相振荡器 (PDRO) V_0 (其频率为 7.5 GHz) 经过 4 分频后传送至发射端, 经过环形器和单向放大器, 再传回接收端, 表示为

$$V'_0 = \sin\left(\frac{\omega_0}{4}t + \frac{\varphi_0}{4} + 2 \times 1.875\varphi_p\right), \quad (3)$$

式中: ω_0 为传输信号的频率; φ_0 为传输信号的相位。将接收到的 V'_r 和 V'_0 混频得到 V_1 , 表示为

$$V_1 = \sin\left(\frac{4\omega_r - \omega_0}{4}t + \varphi_r - \frac{\varphi_0}{4} - 0.75\varphi_p\right). \quad (4)$$

同时将 V'_r 和 V_0 混频得到 V_2 , 表示为

$$V_2 = \sin\left[(\omega_0 - \omega_r)t + \varphi_0 - \varphi_r - 3\varphi_p\right]. \quad (5)$$

对 V_2 进行 4 分频后再与 V_1 进行混频得到控制锁相环的误差信号 V_e , 表示为

$$V_e = \sin\left(\frac{2\omega_0 - 5\omega_r}{4}t + \frac{2\varphi_0 - 5\varphi_r}{4}\right). \quad (6)$$

当锁相环闭环后, 得到

$$\begin{cases} \omega_0 = \frac{5}{2}\omega_r \\ \varphi_0 = \frac{5}{2}\varphi_r \end{cases}. \quad (7)$$

因此, 接收端的 V_0 锁定到了参考信号上。

在接收端锁定后, 将具体分析光纤链路中任一中途下载点的信号情况。在需要下载微波信号的地方采用 2×2 光纤耦合器链接在光纤链路中, 其分束比为 9:1, 然后采用单向掺铒光纤放大器 (EDFA) 放大链路中的信号光。在理论分析之前, 首先设下载点距发射端的相位波动为 φ_d (其为 1 GHz 微波信号在光纤链路中传输引入的相位扰动), 所以从下载点到接收端的相位波动为 $\varphi_p - \varphi_d$, 如图 3 所示。

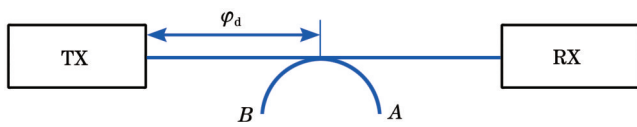


图 3 中途下载相位示意图

Fig. 3 Diagram of midway download phase

首先, 从发射端传过来的信号, 如图 3 中的 A 点, 其中包含从发射端传来的参考信号和从发射端返回来的接收端的发射信号, 即如图 2 中的 3 GHz 和 1.875 GHz 信号。其中 A 点的 3 GHz 信号表示为

$$V_{r,A} = \sin(\omega_r t + \varphi_r + 3\varphi_d), \quad (8)$$

A 点的 1.875 GHz 信号表示为

$$V_{0,A} = \sin\left(\frac{\omega_0}{4}t + \frac{\varphi_0}{4} + 1.875\varphi_p + 1.875\varphi_d\right). \quad (9)$$

在图 3 中的 B 点, 即在图 2 中的 1.875 GHz 信号, 其表示为

$$V_{0,B} = \sin\left(\frac{\omega_0}{4}t + \frac{\varphi_0}{4} + 1.875\varphi_p - 1.875\varphi_d\right). \quad (10)$$

将 $V_{0,A}$ 与 $V_{0,B}$ 进行上混频, 得到

$$V_3 = \sin\left(\frac{\omega_0}{2}t + \frac{\varphi_0}{2} + 3.75\varphi_p\right). \quad (11)$$

将式 (7) 代入到式 (11) 中, 并进行 2 分频得

$$V_4 = \sin\left(\frac{5\omega_r}{8}t + \frac{5\varphi_r}{8} + 1.875\varphi_p\right), \quad (12)$$

然后将 $V_{r,A}$ 进行 5/8 分频后与 $V_{0,B}$ 进行上混频, 得到

$$V_5 = \sin\left(\frac{2\omega_0 + 5\omega_r}{8}t + \frac{2\varphi_0 + 5\varphi_r}{8} + 1.875\varphi_p\right). \quad (13)$$

将式 (7) 代入到式 (13) 中, 可得

$$V_5 = \sin\left(\frac{5\omega_r}{4}t + \frac{5\varphi_r}{4} + 1.875\varphi_p\right), \quad (14)$$

将 V_4 和 V_5 进行下混频, 可得

$$V_6 = \sin\left(\frac{5\omega_r}{8}t + \frac{5\varphi_r}{8}\right), \quad (15)$$

即中途下载的微波频率为 1.875 GHz, 为了使中途下载的信号质量更好, 可对 V_6 再次进行锁相输出。

3 实验装置

通过以上的原理分析, 当多址光纤微波频率传递技术的远端锁定后, 在整个光纤链路上, 任意一个下载点的微波信号与参考信号都是锁定状态。因此, 在设计实验链路时, 将两个实验一起进行, 如图 2 所示。采用 2 km 光纤卷轴和 50 km 光纤卷轴通过 2×2 的光纤耦合器连接起来, 光纤耦合器的分束比为 9:1, 在 50 km 光纤卷轴之后熔接对应长度的光纤色散补偿光纤, 减小光纤链路中的色散影响。

在进行多址光纤微波频率传递技术实验时, 在发射端, 采用商用信号源 (Keysight E8257D) 产生 3 GHz 信号, 经过功率分配器分成两路信号: 一路直接外调制到载波激光上; 另一路作为链路的稳定度测试信号。同时, 为了避免信号光的寄生反射和背向散射的影响, 在发射端和接收端采用不同波长的激光器: 发射端采用 1551.72 nm (C32 通道) 的激光器; 接收端采用 1550.92 nm (C33 通道) 的激光器。

本文采用相位比较法测量多址光纤微波传递技术的稳定度, 测试方法如图 4 所示, 将接收端 7.5 GHz 信号进行 2/5 分频后与发射端的 3 GHz 信号混频后进入数字万用表 (Keysight 3458A) 测量, 具体过程如下: 采用万用测量电压信号 $V(t)$, 并以 1 s 的采样间隔记录电压数据。通过以下公式换算, 将该电压信号 $V(t)$ 数

据转换为传输时延差数据 $\Delta t = \frac{1}{\omega_0/2} \arcsin\left[\frac{V(t)}{a/2}\right]$,

a 为被测信号 $V(t)$ 的相位在 2π 的范围内变化时 $V(t)$ 的峰峰值, ω_0 为 3 GHz 传递信号的角频率, 计算 Δt 的 Allan 方差即可表征光纤传递链路的稳定度。

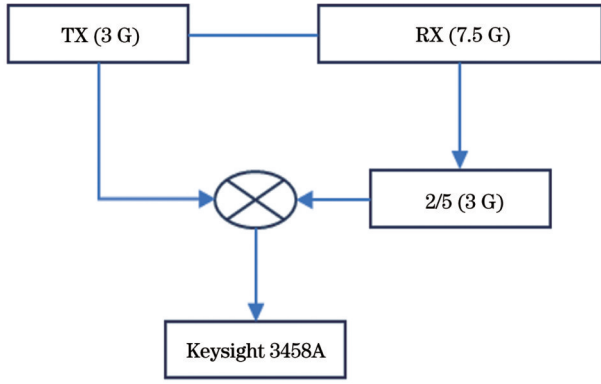


图 4 多址传输远程端稳定度测试框图

Fig. 4 Block diagram for stability test of multi-access transmission remote end

在进行中途下载时,首先用波分复用将图中的 A 点处的两个微波频率分开,其中 C32 通道端输出参考信号的 3 GHz 信号;C33 通道端输出返回来的 1.875 GHz 信号。在变频的过程中, V_4 和 V_5 进行下混频时由于频率为整数倍的原因会产生交调失真等影响,因此在进行相应的下混频时,额外引入一个 1 GHz 的信号,将 V_4 和 V_5 分别先与该信号进行上混频、滤波以及放大后再进行相应的下混频,减小交调失真对混频信号的影响。具体的实验原理图如图 5 所示。

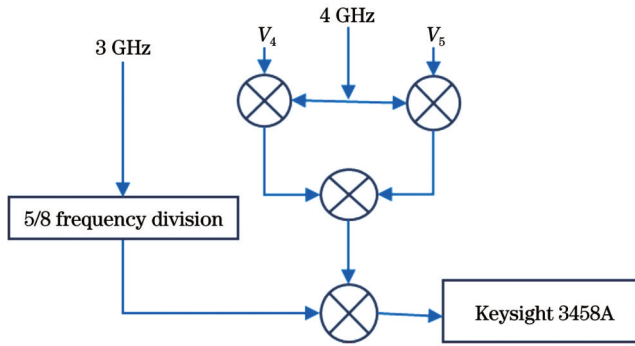


图 5 多址传输中途下载稳定度测试框图

Fig. 5 Block diagram for stability test of midway download through multi-access transmission

同样采用相位比较法测量光纤链路中的中途下载微波信号与参考信号的稳定度,如图 5 所示,对参考信号进行 8 分频取 5 次谐波,与下载点经过微波处理后的 1.875 GHz 信号进行混频,用数字万用表 (Keysight 3458A) 进行测量,然后做相应的分析。

4 分析与讨论

通过以上的实验设计,首先测试了多址光纤微波传递技术的接收端残余相位噪声,将发射端的 3 GHz 信号进行 10 分频得到 300 MHz 信号,同时将接收端的 7.5 GHz 信号进行 50 分频得到 150 MHz 信号,将这两个信号分别输入 Symmetricom 5125A 中测量,其中 300 MHz 作为参考信号,测试结果如图 6 所

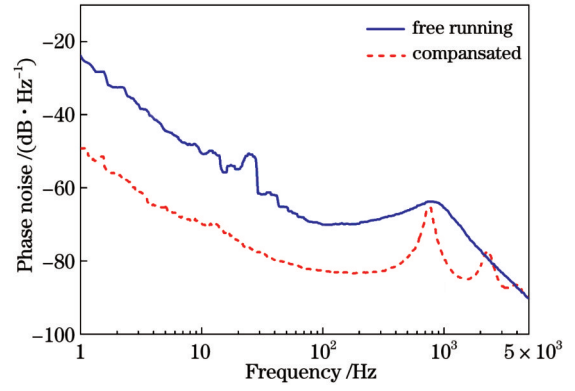


图 6 7.5 GHz 信号的残余相位噪声

Fig. 6 Residual phase noise of 7.5 GHz signal

示,其中直线表示 7.5 GHz PDRO 相锁到自由运行的 100 MHz OCXO 的单边带相位噪声频谱,短划线表示多址光纤微波传递技术被锁定时,接收端的 7.5 GHz 信号的单边带相位噪声。短划线中约 800 Hz 处的凸起是锁相环的伺服峰值。通过该方案的相位噪声消除,大大优化了接收端 7.5 GHz 信号的相位噪声谱。

同时,基于以上的实验装置分别测试了远端 7.5 GHz 信号的稳定度和中途下载 1.875 GHz 的稳定度,如图 7 所示。远端 7.5 GHz 信号在 1 s 和 10^5 s 的稳定性与中心站点的 3 GHz 参考信号相比,如图中圆点虚线所示,其稳定度分别为 $3.5 \times 10^{-14}/s$ 和 $1.2 \times 10^{-17}/10^5 s$;方块点划线表示中途下载的 1.875 GHz 信号输出信号的稳定性,其稳定度分别为 $4.1 \times 10^{-14}/s$ 和 $6.5 \times 10^{-17}/10^5 s$ 。同时测量了测试模块的本底噪声,如图中三角形直线所示。

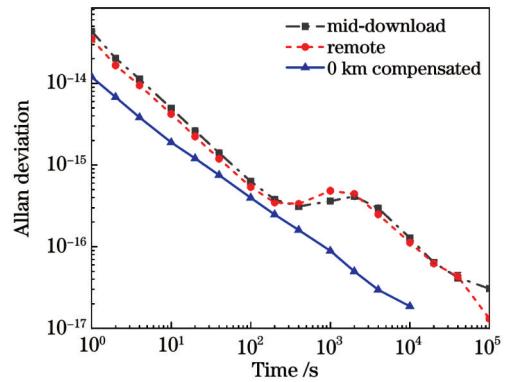


图 7 光纤微波频率传递链路的稳定度

Fig. 7 Stability of fiber optic microwave frequency transmission system

在光纤微波传输的过程中,采用单向 EDFA 放大光功率以满足光电探测器的功率输入要求,其会增加光纤链路中的非对称性,影响系统的传播稳定度;但由于单向 EDFA 的非对称性,在光纤链路中无法完全对其噪声进行补偿,降低系统传递的稳定度。为了避免微波信号的相互干扰,在传递过程中选择 1.875 GHz

和 3 GHz 作为传播频率,这两个频点没有谐波重叠,不会引入交调失真。

5 结 论

综上所述,本文提出了一种多址频率传输及其中途下载的光纤微波频率传递系统。该系统采用不同光波长进行微波信号的传输,避免了信号光的寄生反射和背向散射的影响,实现多址频率传输的稳定度分别为 $3.5 \times 10^{-14}/\text{s}$ 和 $1.2 \times 10^{-17}/10^5 \text{ s}$;中途下载的稳定度分别为 $4.1 \times 10^{-14}/\text{s}$ 和 $6.5 \times 10^{-17}/10^5 \text{ s}$ 。通过在接收端进行链路噪声的补偿,大大降低了发射端的空间要求和复杂性。同时,该方案可满足多个用户传递标准的微波频率,具有广泛的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Grainge K, Alachkar B, Amy S, et al. Square kilometre array: the radio telescope of the XXI century[J]. *Astronomy Reports*, 2017, 61(4): 288-296.
- [2] Selina R J, Murphy E J, McKinnon M, et al. The next generation very large array: a technical overview[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10700: 107001O.
- [3] He Y B, Baldwin K G H, 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] Gao C, Wang B, Chen W L, et al. Fiber-based multiple-access ultrastable frequency dissemination[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(22): 4690-4692.
- [5] Riehle F. Optical clock networks[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11: 25-31.
- [6] Matveev A, Parthey C G, Predehl K, et al. Precision measurement of the hydrogen 1S-2S frequency via a 920-km fiber link[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(23): 230801.
- [7] Guo Y C, Wang B, Si H W, et al. Correlation measurement of co-located hydrogen masers[J]. *Metrologia*, 2018, 55(5): 631-636.
- [8] Predehl K, Grosche G, Raupach S M F, et al. A 920-kilometer optical fiber link for frequency metrology at the 19th decimal place[J]. *Science*, 2012, 336(6080): 441-444.
- [9] Lisdat C, Grosche G, Quintin N, et al. A clock network for geodesy and fundamental science[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12443.
- [10] 李得龙, 卢麟, 张宝富, 等. 基于相位波动远端补偿的微波频率光纤传递新方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(7): 0706001. Li D L, Lu L, Zhang B F, et al. New microwave frequency dissemination method over optical fiber based on the phase fluctuation compensated at remote sites[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0706001.
- [11] 常乐, 董毅, 孙东宁, 等. 光纤稳相微波频率传输中相干瑞利噪声的影响与抑制[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0506004. Chang L, Dong Y, Sun D N, et al. Influence and suppression of coherent Rayleigh noise in fiber-optic-based phase-stabilized microwave-frequency transmission system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0506004.
- [12] Lopez O, Amy-Klein 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Ning B, Zhang S Y, Hou D, et al. High-precision distribution of highly stable optical pulse trains with 8.8×10^{-19} instability[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 5109.
- [16] Wang B, Zhu X, Gao C, et al. Square kilometre array telescope: precision reference frequency synchronisation via 1f-2f dissemination[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 13851.
- [17] Li H W, Wu G L, Zhang J P, et al. Multi-access fiber-optic radio frequency transfer with passive phase noise compensation [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(24): 5672-5675.
- [18] 姜瑶, 邹喜华, 严相雷, 等. 基于被动补偿的点到多点微波信号光纤稳相传输[J]. *光学学报*, 2019, 39(9): 0906005. Jiang Y, Zou X H, Yan X L, et al. Point-to-multipoint phase-stabilized microwave signal transmission in optical fiber links using passive phase compensation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 0906005.

Multi-Access Fiber Microwave Frequency Transmission Technology

Yu Shaoshao^{1,2}, Quan Honglei^{1,2}, Zhao Wenyu^{1,2}, Xue Wenxiang³, Wang Xin^{1,2}, Zhang Shougang^{1,2*}

¹Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, Shaanxi, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³School of Communications and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, Shaanxi, China

Abstract

Objective The fiber optic microwave frequency transmission technology is based on the loopback method to detect and suppress fiber optic noise. Under the adoption of existing communication fiber links, the frequency transmission stability can reach $10^{-18}/\text{d}-10^{19}/\text{d}$, which meets the remote transmission and comparison of current microwave atomic reference frequency standards, with broad application prospects. At present, most of the solutions are point-to-point master-slave

station transmission structures, and in many application scenarios, it is necessary to deliver a reference frequency source to multiple users (multiple access), and even add a midway download point in the transmission fiber link, such as square kilometer array (SKA), radio telescope array, and very-long-baseline interferometry (VLBI). The high-precision ground-based time service project undertaken by the National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences includes the construction of a thousand-kilometer level fiber optic microwave frequency transmission network, which employs the unique electrical phase compensation transmission scheme of the center. As a supplement to the backbone transmission network, the local frequency distribution network needed for the future is constructed, and a set of multi-access transmission and mid-download equipment schemes compatible with the existing system is designed to enhance the regional service capability of the high-precision ground-based timing system. As a result, the standard frequency signal in the backbone network can reach the client within 100 km of the urban node to complete the local frequency signal distribution task of the city node.

Methods The system diagram of multi-access fiber microwave frequency transmission technology is shown in Fig. 1, where TX is the common transmitting end and RX1–RXN are multiple receiving ends, or there are multiple addresses. At the transmitter TX, the reference signal is modulated onto the laser carrier by a Mach-Zehnder modulator (MZM) and an external modulation. Then, by adopting a fiber splitter, the signal light is divided into N channels and transmitted to N addresses respectively. Firstly, a principle analysis of microwave frequency transmission technology of multi-access fiber is carried out to show the feasibility of the experimental scheme. Then the experimental verification is carried out in the laboratory: the 2 km fiber spool and 50 km fiber spool are connected by the 2×2 fiber coupler, and the beam splitting ratio of the fiber coupler is 9:1. After the 50 km fiber spool, the fiber dispersion compensation fiber of the corresponding length is fused to reduce the dispersion effect in the fiber link.

Results and Discussions By utilizing the above experimental design and device link, Symmetricom 5125A is adopted to measure the residual phase noise at the receiving end of the multi-access fiber optic microwave transmission technology. The results are shown in Fig. 6. The phase noise spectrum of the 7.5 GHz signal at the receiving end is greatly optimized via phase noise elimination of the scheme. Meanwhile, the stability of multi-access fiber microwave transmission technology is measured by phase comparison method. The voltage signal is tested by digital multimeter 3458A according to the test block diagram in Figs. 4 and 5. The results are shown in Fig. 7. The frequency stability of the remote 7.5 GHz signal is $3.5 \times 10^{-14}/\text{s}$ and $1.2 \times 10^{-17}/10^5 \text{ s}$. The stability of mid-download is $4.1 \times 10^{-14}/\text{s}$ and $6.5 \times 10^{-17}/10^5 \text{ s}$. In the process of multi-access fiber microwave frequency transmission technology, the unidirectional erbium-doped fiber amplifier (EDFA) is employed to amplify the optical power, which will increase the asymmetry in the fiber link and affect the propagation stability of the system. Due to the nonlinear effect of devices, nonlinear effects inevitably occur during signal processing, which affects the phase detection accuracy. To avoid the influence of nonlinearity, we adopt 1.875 GHz and 3 GHz as the propagation frequencies. Signals at 1.875 GHz and 3 GHz do not have harmonic overlap and cannot generate intermodulation components of similar frequencies.

Conclusions We propose an fiber optic microwave frequency transmission system with multi-access frequency transmission and midway download, which adopts different optical wavelengths to transmit microwave signals and thus avoid the effects of parasitic reflection and backscattering of signal light. The scheme has two main features. Firstly, the link noise compensation is implemented in the receiving end by electrical phase compensation method, and the fiber optic link is compensated for due to temperature noise disturbance caused by external environmental changes such as stress. Secondly, the dispersion compensation fiber in the transmission system is also placed at the receiving end to compensate for the dispersion impact in the fiber link. The stability of remote frequency transmission is $3.5 \times 10^{-14}/\text{s}$ and $1.2 \times 10^{-17}/10^5 \text{ s}$, and that of mid-download is $4.1 \times 10^{-14}/\text{s}$ and $6.5 \times 10^{-17}/10^5 \text{ s}$. The index of multi-access fiber optic microwave frequency transmission system can meet the requirement of microwave atomic frequency signal long-distance transmission in various applications, with a wide application prospect.

Key words optical fiber microwave; frequency transmission; microwave frequency; phase locking technology