

基于模拟移相补偿的长距离光纤频率传输

任丽霞 章双佑 钱 程 赵建业

北京大学信息科学技术学院, 北京 100871

摘要 为实现频率信号在长距离光纤上的高精度传输,设计了一个纯电的相位补偿系统,其补偿速度较快,范围较大,且便于模块化。该系统主要利用两次模拟移相抵消返回信号中所引入的双程相位抖动来进行补偿,结构简单,易于调试。通过引入数字信号处理和比例积分微分(PID)控制算法,可以提高系统的补偿精度和工作稳定性。最后,利用该系统在100 km的实验室光纤上进行100 MHz频率信号的传输实验,得到的频率稳定度为 $3.9 \times 10^{-14}/s$ 和 $1.1 \times 10^{-16}/4000 s$,证明了此方法在长距离光纤频率传输中的可行性,为导航、航天以及空间探测等领域中远距离站点的协同工作,提供频率同步支持。

关键词 光纤光学; 频率传输; 相位抖动补偿; 模拟移相; 长距离

中图分类号 TN929.11; P127.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0405005

Radio-Frequency Transfer over a Long-Distance Fiber Link Based on Analog Phase Shift Compensation

Ren Lixia Zhang Shuangyou Qian Cheng Zhao Jianye

School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract To achieve high-stability and high-precision dissemination of radio frequency signals over a long distance optical fiber link, a pure-electric phase compensation system is proposed. It can be easily modularized and achieve highly compensation speed and range. This system mainly uses two analog phase shifters to balance the phase fluctuation introduced by the round-trip fiber link. Due to the simple structure, it is easy to debug and test. By introducing the digital signal processing and proportion integration differentiation (PID) control algorithm, the system can effectively compensate the fiber-induced phase noise and ensure a high-accuracy frequency distribution. Finally, using this system in a 100 MHz frequency transfer experiment via 100 km optical fiber, an stabilities of $3.9 \times 10^{-14}/s$ and $1.1 \times 10^{-16}/4000 s$ are achieved. The experiment proves that this system is feasible in the long-distance radio frequency transfer and provides a technical support for the frequency synchronization needed in the cooperative working of remote stations, such as navigation, aerospace and space exploration.

Key words fiber optics; frequency transfer; phase fluctuation compensation; analog phase shift; long distance

OCIS codes 060.2310; 060.2360; 060.5625; 120.7000

1 引 言

频率传输是基于现代科学实验和实际应用需要而发展起来的一项技术,其目的是使相距较远的两个或多个地点的基准频率达到同步,从而实现多点高精度频率的共享^[1],且高精度的频率传输现在已经逐渐应用于通信、导航、空间探测及基础物理研究等领域。由于光纤具有损耗低、稳定性高、抗电磁干扰能力强^[2],且现代光纤通信网络已大量铺设等特点,利用光纤进行长距离、高精度的频率传输已经成为其研究重点之一。但是当采用光纤链路传递频率信息时,由于物理震动、温度变化引起的链路长度变化、折射率变化等因

收稿日期: 2014-10-20; 收到修改稿日期: 2014-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(61371074)

作者简介: 任丽霞(1988—),女,硕士研究生,主要从事光纤时频传输方面的研究。E-mail: ren_lixia@126.com

导师简介: 赵建业(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事原子钟、时频传输、激光稳频技术、微波光子学等方面的研究。

E-mail: zhaojianye@pku.edu.cn(通信联系人)

素,会使微波信号传输的光程发生改变^[3],从而导致其相位发生抖动,即在接收端的频率信号中引入相位噪声,降低远端频率稳定度。

目前,解决这种链路抖动的方法主要是1994年由Ma等^[4]提出的共轭环路补偿法。近几年,利用该方法得到的光纤射频(RF)传输的频率稳定度有很大提高^[5-16],如国内清华大学在80 km实地光纤上实现的射频传输实验,频率稳定度达到 $7 \times 10^{-15}/s$ 和 $4.5 \times 10^{-19}/d$ ^[9]。共轭环路补偿法主要有两种方式:光学相位补偿和电学相位补偿。光学相位补偿一般采用基于压电陶瓷的光纤拉伸器和温控长光纤等方法,前者可以进行快速补偿,但是受限于压电陶瓷的伸缩范围,其补偿范围有限;后者可以进行长距离补偿,但是补偿速度较慢^[5-8]。电补偿一般是通过直接改变调制在激光上的微波信号的相位来进行预补偿^[9-16],其补偿速度较快,且结构相对简单。鉴于电补偿结构简单、便于集成的特点,本文设计了一套基于模拟移相器的纯电相位补偿系统,并对该系统在100 km实验室光纤上进行验证,得到了较好的稳定度。

2 光纤链路抖动补偿

2.1 理论分析

共轭环路补偿法的基本原理是通过探测本地参考信号与经过光纤链路的返回信号的相位差的变化,对环路的相位抖动进行补偿。基于该原理,通过采用两次模拟移相平衡返回信号所引入的双程相位抖动的方法,设计了一个纯电的相位补偿系统,其补偿原理如图1所示。从图中可以看出,该系统减少了对倍频、分频、带通滤波器等高频器件的使用,降低了系统结构的复杂度,同时也提高了系统的稳定性。

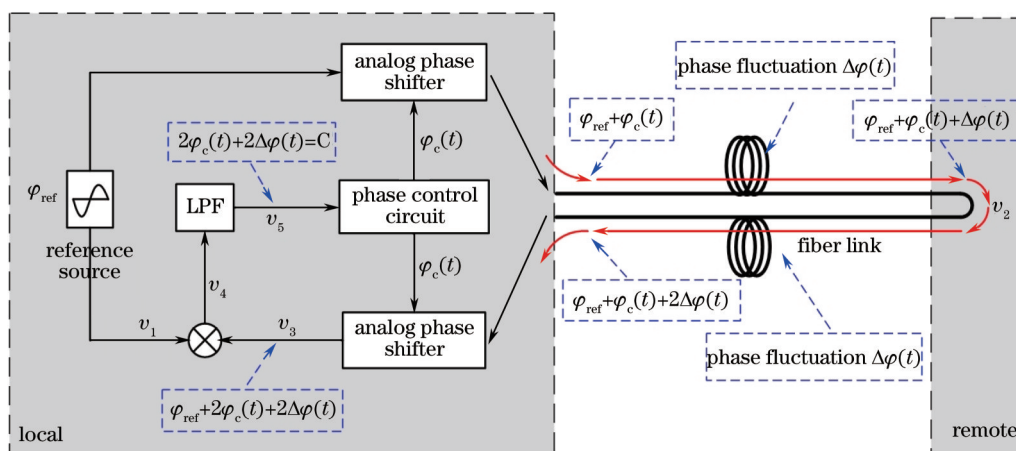


图1 相位抖动补偿系统原理图

Fig.1 Principle of phase fluctuation compensation system

如图1所示,假设本地(local)参考源(reference source)信号 v_1 的初始相位为 φ_{ref} , 幅度为1, 即

$$v_1 = \cos(\omega t + \varphi_0) = \cos \varphi_{ref}, \quad (1)$$

经第一个模拟移相器后预补偿的相位为 $\varphi_c(t)$, 而光纤链路所引入的相位抖动(phase fluctuation)为 $\Delta\varphi(t)$, 则远端(remote)接收到的信号为

$$v_2 = \cos[\varphi_{ref} + \varphi_c(t) + \Delta\varphi(t)], \quad (2)$$

将远端信号返回光纤继续传输后,再经过第二个模拟移相器,移动相同的相位 $\varphi_c(t)$, 此时,所得到的信号为

$$v_3 = \cos[\varphi_{ref} + 2\varphi_c(t) + 2\Delta\varphi(t)], \quad (3)$$

将本地的参考信号 v_1 与返回信号 v_3 进行鉴相, 得到

$$v_4 = v_1 v_3 = \cos \varphi_{ref} \times \cos[\varphi_{ref} + 2\varphi_c(t) + 2\Delta\varphi(t)] = 0.5 \times \{ \cos[2\varphi_{ref} + 2\varphi_c(t) + 2\Delta\varphi(t)] + \cos[2\varphi_c(t) + 2\Delta\varphi(t)] \}, \quad (4)$$

信号 v_4 经过低通滤波器(LPF)滤除高频成分后, 得到

$$v_5 = 0.5 \times \cos[2\varphi_c(t) + 2\Delta\varphi(t)], \quad (5)$$

此时, 只要通过精确的相位控制电路保证鉴相信号 v_5 的相位为恒定值, 即 $2\varphi_c(t) + 2\Delta\varphi(t) = C$, 则远端得到的

频率信号 $v_2 = \cos(\varphi_{\text{ref}} + C/2)$ 的相位也是恒定值,即远端频率稳定。为保证控制精度,一般取 $C = \pi/2$,此时余弦信号斜率最大,鉴相灵敏度最高。这相对于之前通过返回的鉴相信号 $\cos \Delta\varphi(t)$ 去寻找、计算模拟移相器的移相值 $\varphi_c(t)$ 的系统^[15]来说,降低了算法的复杂度,更易于调试和使系统进入稳定状态;同时也提高了补偿精度和增大了补偿距离。

2.2 搭建实验系统

根据上述理论分析,搭建的实验系统如图2所示。实验利用 ROHDE & SCHWARZ SMB 100A 微波源产生 100 MHz 的射频信号,通过一高频模拟移相器预补偿后,采用幅度调制的方式加载到 1550 nm 的分布反馈式(DFB)激光器上,经环形器(OC)输入到 100 km 光纤中进行传输。实验中采用的单向掺铒光纤放大器(EDFA)可以补偿信号在传输过程中的功率损耗,但是 EDFA 增益太大会对信号的信噪比产生影响^[17],也会对光电探测器(PD)的探测效率有影响,所以 EDFA 的增益应当等于或小于链路衰减,以减小 EDFA 引入的噪声。同时为了提高接收信号的信噪比(SNR),降低光纤内非线性散射,尤其是瑞利散射噪声对远端和返回信号的影响,在远端需要将射频信号通过 PD 探测下来^[18],并经电放大(AMP)、带通滤波(BPF)后重新调制到 DFB 激光器上,用于反向传输。

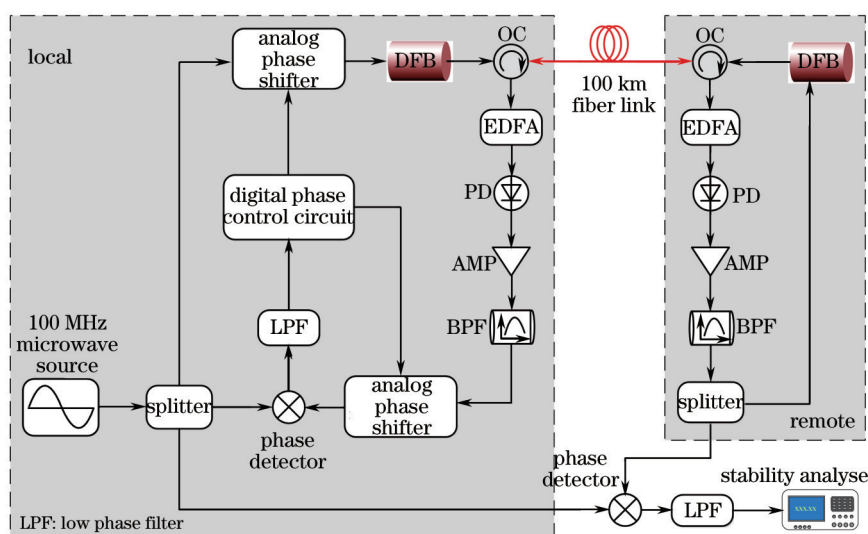


图2 实验系统框图

Fig.2 Block diagram of the experimental system

返回信号经过放大滤波后需要再次经过一个模拟移相器,并移动和预补偿相同的相位,然后与本地的参考信号进行混频鉴相。所得到的鉴相信号的低频分量,经过 16 bit 的模数转换器(AD7683)转换为数字信号,然后利用数字信号处理器(DSP)芯片(德州仪器的 TMS320VC5416)进行一定的数字信号处理,从而去控制 16 bit 的数模转换器(AD5060)输出移相电压。由于实验中使用的是 180° 高频移相器(Mini-Circuits JSPHS-150+),所以其最小控制移相精度可以达到 $\pi/65536 \approx 5 \times 10^{-5}$ rad,对于补偿 100 km 长距离光纤所引入的相位抖动和漂移已经足够。

因为实验需要通过调整移相器来对光纤链路进行实时地补偿,所以数字电路输出的移相电压必须很可靠,这就要求数字信号处理算法很准确。根据 2.1 的理论分析可知,要保证远端信号的相位稳定,实验只需要保证回波鉴相信号的低频分量的相位稳定,即 $2\varphi_c(t) + 2\Delta\varphi(t)$ 为 $\pi/2$ 。由于 DSP 相位控制电路是对鉴相电压进行处理,然后给出移相电压,所以实际操作中只需要保证鉴相电压 v_s 为 0 即可。当 v_s 大于 0 时,说明 $2\varphi_c(t) + 2\Delta\varphi(t)$ 小于 $\pi/2$,此时应该相应地加大 $\varphi_c(t)$,即提高移相电压;当 v_s 小于 0 时,说明 $2\varphi_c(t) + 2\Delta\varphi(t)$ 大于 $\pi/2$,此时应该相应地减小 $\varphi_c(t)$,即降低移相电压。

同时鉴于该相位补偿系统是一个闭环的控制系统,故实验中引入了比例积分微分(PID)算法^[19]。通过对移相器和鉴相器各自的电压相位关系,以及它们之间的比例关系进行精确的量化可以确定 PID 的参数,最终使系统达到一个稳定的状态。实验采用模拟电子技术与数字信号处理技术相结合的方式,较易实现且工作

稳定,对于抑制光纤链路抖动带来的相位噪声很有效果。

3 实验结果

对于频率传输质量的评定,一般采用对比相结果进行阿伦方差计算的方法,这是因为频率是相位的一阶导数,相位的随机抖动必然会导致频率的随机抖动。如图2所示,实验将远端所得频标与本地频标混频鉴相后的信号,通过一低通滤波器,输入高精度的电压计数器,用于记录测量结果。

图3为100 MHz频率信号在100 km光纤上进行传输,测到的开环(未进行补偿、free)和闭环(进行补偿、compensated)情况下的相位漂移对比。其中测量的带宽为3 Hz,数据的采样时间间隔为1 s,测量的总时间为6.4 h。从图中可以看出,开环情况下,接收端信号与本地信号相比,相位漂移了约2.8 ns;而闭环情况下,相位漂移范围大大减小,基本控制在2 ps以内,说明该系统可以有效抑制光纤频率传输的相位漂移。

在上面测量结果的基础上可以计算接收端射频(RF)信号的频率稳定度,现在国内外很多研究都采用重叠采样阿伦方差对这项指标进行表征^[4-17],所使用的软件为Stable 32,计算结果如图4所示。图中除给出了开环和闭环情况下的频率稳定度外,还给出了用2 m光纤代替100 km所测得的系统电噪声(noise floor)和由于两个模拟移相器的不一致性所引入的误差信息(phase shifter)。从图中曲线可以看出,闭环情况下,在采样时间为1 s时,频率稳定度约为 $3.9 \times 10^{-14}/s$;在采样时间为4000 s时,稳定度达到了 $1.1 \times 10^{-16}/4000 s$ 。与开环情况相比,其长期稳定度提高了近3个量级,达到了较好的稳定度水平。这说明该系统可以有效地补偿长距离光纤频率传输的相位抖动。而且如果系统中的移相器采用 360° 模拟移相器(如Hittite Microwave的HMC877LC3),那么可以实现循环补偿,此时系统的补偿范围将不受限制,从而可以抑制更长时间的相位漂移。

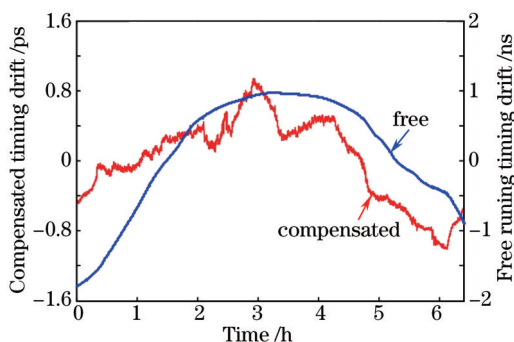


图3 实验系统在开环和闭环情况下的相位漂移测量结果
Fig.3 Measured phase fluctuation of the experimental system in free and compensated states

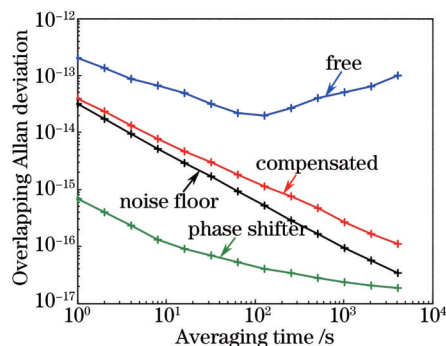


图4 接收端射频信号的频率稳定度
Fig.4 Frequency stability of the RF signal measured at the remote end

该系统不仅可以有效抑制传输过程中引入的相位噪声,而且其结构简单,调试方便,便于集成,在未来光纤频率传输系统的模块化方面有着很大的优势。此外,本文达到的稳定度指标,可以满足导航、航天、空间探测等领域的应用需求,有望应用于平方公里射电望远镜阵列(SKA)项目,为远距离基站协同工作所需的频率同步提供技术支持。同时作为一个纯电系统,该方法在其他领域也具有很大的应用潜力。

4 结 论

介绍了一个纯电的光纤链路抖动补偿系统,该系统采用两次模拟移相,以补偿返回信号的双程相位抖动,结构简单,易于实现和应用。通过引入数字信号处理和PID控制算法,使得系统稳定且补偿精度很高。利用该系统在100 km光纤上完成100 MHz频率信号的传输实验,稳定度达到 $3.9 \times 10^{-14}/s$ 和 $1.1 \times 10^{-16}/4000 s$,验证了其可以有效抑制长距离光纤频率传输中的相位噪声,为频率信号的长距离传输提供了技术支持。

参 考 文 献

- 1 J Levine. A review of time and frequency transfer methods[J]. Metrologia, 2008, 45(6): 162-174.
- 2 L Sliwczynski, P Krehlik, M Lipinski. Optical fibers in time and frequency transfer[J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(7): 075302.
- 3 Li Delong, Cheng Qingming, Zhang Baofu, et al.. Research on the impact of optical fiber link delay fluctuation on frequency transfer

- stability[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(1): 010602.
- 李得龙, 程清明, 张宝富, 等. 光纤链路时延波动对频率传递稳定度的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(1): 010602.
- 4 L S Ma, P Jungner, J Ye, *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]. *Opt Lett*, 1994, 19(21): 1777-1779.
- 5 O Lopez, A Amy-Klein, C Daussy, *et al.*. 86-km optical link with a resolution of 2×10^{-18} for RF frequency transfer[J]. *European Physical D*, 2008, 48(1): 35-41.
- 6 O Lopez, A Amy-Klein, M Lours, *et al.*. High-resolution microwave frequency dissemination on an 86-km urban optical link[J]. *Appl Phys B*, 2010, 98(4): 723-727.
- 7 G Marra, R Slavik, H S Margolis, *et al.*. High-resolution microwave frequency transfer over an 86-km-long optical fiber network using a mode-locked laser[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(4): 511-513.
- 8 Chen Ruihao, Wu Guiling, Zou Weiwen, *et al.*. Optical phase compensation system design for frequency transfer over optical fiber[J]. *Optical Communication Technology*, 2014, 4: 1-4.
- 陈瑞昊, 吴龟灵, 邹卫文, 等. 光纤频率传输光学相位补偿系统设计[J]. *光通信技术*, 2014, 4: 1-4.
- 9 B Wang, C Gao, W L Chen, *et al.*. Precise and continuous time and frequency synchronisation at 5×10^{-19} accuracy level[J]. *Scientific Reports*, 2012, 2: 556.
- 10 Ł Śliwczynski, P Krehlik, A Czubla, *et al.*. Dissemination of time and RF frequency via a stabilized fibre optic link over a distance of 420 km[J]. *Metrologia*, 2013, 50(2): 133-145.
- 11 M Kumagai, M Fujieda, S Nagano, *et al.*. Stable radio frequency transfer in 114 km urban optical fiber link[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(19): 2949-2951.
- 12 M Amemiya, M Imae, Y Fujii, *et al.*. System for precise dissemination of frequency standard via optical fiber[J]. *Electronics and Communications in Japan*, 2012, 95(3): 45-54.
- 13 Yabai He, B J Orr, K G H Baldwin, *et al.*. Stable radio-frequency transfer over optical fiber by phase-conjugate frequency mixing [J]. *Opt Express*, 2013, 21(16): 18754-18764.
- 14 B Ning, P Du, D Hou, *et al.*. Phase fluctuation compensation for long-term transfer of stable radio frequency over fiber link[J]. *Opt Express*, 2012, 20(27): 28447-28454.
- 15 B Ning, D Hou, T Zheng, *et al.*. Hybrid analog-digital fiber-based radio-frequency signal distribution[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2013, 25(16): 1551-1554.
- 16 Li Delong, Lu Lin, Zhang Baofu, *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.
- 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.
- 17 Hua Yun, Gui Youzhen, Yang Fei, *et al.*. Analysis of repeater for time and frequency dissemination via optical fiber[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(9): 0905002.
- 华 芸, 桂有珍, 杨 飞, 等. 光纤时频传输系统的中继技术分析[J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0905002.
- 18 Chang Le, Dong Yi, Sun Dongning, *et al.*. Influence and suppression of coherent Rayleigh noise in fiber-optical-based phase-stabilized microwave-frequency transmission system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0506004.
- 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和抑制[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0506004.
- 19 He Zhiqiang. Parameters Tuning of PID Controller and Its Application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005: 1-35.
- 何芝强. PID控制器参数整定方法及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005: 1-35.

栏目编辑: 王晓琰