

200 km沙漠链路高精度光纤时频传递关键技术研究

应康 桂有珍 孙延光 程楠 熊晓锋 王家亮 杨飞 蔡海文

Key technology of high-precision time frequency transfer via 200 km desert urban fiber link

Ying Kang Gui You-Zhen Sun Yan-Guang Cheng Nan Xiong Xiao-Feng Wang Jia-Liang Yang Fei
Cai Hai-Wen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 060602 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20182000

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182000>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于光纤的光学频率传递研究

Study of optical frequency transfer via fiber

物理学报. 2015, 72(12): 120602 <https://doi.org/10.7498/aps.64.120602>

长距离多站点高精度光纤时间同步

High-precision long-haul fiber-optic time transfer between multi stations

物理学报. 2017, 74(20): 200701 <https://doi.org/10.7498/aps.66.200701>

分立式与分布式光纤传感关键技术研究进展

Advances of some critical technologies in discrete and distributed optical fiber sensing research

物理学报. 2017, 74(7): 70705 <https://doi.org/10.7498/aps.66.070705>

基于数字相干叠加的相干光正交频分复用系统中光纤非线性容忍性研究

Fiber nonlinearity tolerance research of coherent optical orthogonal frequency division multiplexed system based on digital coherent superposition

物理学报. 2015, 72(14): 144203 <https://doi.org/10.7498/aps.64.144203>

基于色散效应的光纤光栅高速高精度解调方法研究

High speed and high precision demodulation method of fiber grating based on dispersion effect

物理学报. 2017, 74(1): 14206 <https://doi.org/10.7498/aps.66.014206>

用于光频传递的通信波段窄线宽激光器研制及应用

Development and application of communication band narrow linewidth lasers

物理学报. 2015, 72(19): 190601 <https://doi.org/10.7498/aps.64.190601>

200 km 沙漠链路高精度光纤时频传递关键技术研究*

应康¹⁾ 桂有珍²⁾ 孙延光^{1)†} 程楠²⁾ 熊晓锋¹⁾
王家亮²⁾ 杨飞¹⁾ 蔡海文¹⁾

1) (中国科学院上海光学精密机械研究所, 中国科学院空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800)

2) (中国科学院上海光学精密机械研究所, 中国科学院量子光学重点实验室, 上海 201800)

(2018 年 11 月 11 日收到; 2019 年 1 月 9 日收到修改稿)

针对沙漠环境实地链路存在的温度变化大、室外风力、地表振动等多种复杂噪声来源, 通过对系统反馈补偿带宽、反馈补偿强度、光功率等时频传递系统关键参数的优化配置, 研究了不同反馈补偿参数下复杂链路噪声的有效抑制技术. 全链路的频率传递稳定度 $8 \times 10^{-14} @ 1 \text{ s}$, $1 \times 10^{-16} @ 1000 \text{ s}$, 千秒尺度下时间信号传递的时间方差仅为 1.2 ps. 实现了氢钟信号在 200 km 量级沙漠环境实地链路的无损传输. 该验证实验在基于短基线干涉测量的卫星测轨系统中发挥了重要作用.

关键词: 光纤光学, 时频传递, 波分复用, 光学补偿

PACS: 06.30.Ft, 42.81.-i, 52.70.gw

DOI: 10.7498/aps.68.20182000

1 引言

随着现代原子钟技术的不断进步, 商用化的氢钟秒稳定度已经达到 10^{-13} 量级, 而近年来随着光钟技术的飞速发展, 其精度达到了 10^{-19} 量级^[1-8]. 随着钟源技术的发展, 采用传统的基于卫星的时频传递手段, 例如全球定位系统 (GPS) 共视、双向卫星比对等, 由于受大气环境的影响, 已不能完全满足目前的应用需求^[9-11], 并且该方法只能通过长时间的平均来获得频率性能, 很难在秒级时间尺度上提供良好的短期稳定性. 而在基线干涉测量、深空探测等应用领域, 需要各观察站之间的时频信号的高精度同步^[12]. 因此, 研究室外复杂实地链路环境下的高精度时频同步技术, 构建高精度时频同步系

统显得至关重要.

近年来, 由于光纤具有低损耗、抗电磁干扰、高稳定性等特征, 基于光纤的时频传递技术发展迅速, 相关研究结果已经证实了该方法能实现比传统卫星传递方式更高的时频传递精度, 得到国内外同行的广泛重视. 国际上, 法国和波兰的研究工作者先后报道了在商用链路上的射频信号传递^[13,14]; 德国的研究工作者实现了光频信号在 1840 km 光纤上的稳相传输^[15]. 在国内, 本研究组通过波分复用的方式实现了氢钟频率信号和秒脉冲信号的同时传递, 通过两级级联方式实现了 430 km 长距离实验验证^[16,17]; 清华大学相关研究组实现了时间频率共同传递并实现了 50 ps 的时间传递精度^[18]. 然而, 长距离实际光纤链路的环境要比实验室链路复杂得多, 特别是沙漠光纤链路存在温度变化大、室

* 中国科学院战略性先导科技专项 (B 类)(批准号: XDB21030200)、上海市青年科技英才扬帆计划 (批准号: 18YF1426100) 和上海市自然科学基金 (批准号: 18ZR1444300) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ygsun@siom.ac.cn

外风力、地表振动等多种复杂噪声来源. 实际链路中由于线路老化、租用的运营商线路接续点多等导致光纤端面反射带来的杂散噪声大, 长距离传输链路补偿带宽受限, 链路大范围时延突变的补偿能力要求等都是需要重点考虑的因素. 尽管国内外在基于实际光纤链路的时频传递技术有较多研究, 但是在诸如沙漠条件等极端恶劣环境下的长距离光纤时频传递系统研究鲜有报道. 沙漠条件下实际光纤链路架空光缆长、温度变化剧烈带来的大范围时延突变以及线路老化等原因带来光功率损耗大等是主要技术难点. 因此, 研究在沙漠等极端条件下影响光纤时频传输系统性能的限制因素, 探索其中的关键技术难点, 可为未来满足战场条件或恶劣环境条件下的高精度长距离时频同步需求提供可能的解决方案.

本文报道了在新疆某基地沙漠条件的复杂实地链路环境下, 通过光纤时频稳相传输, 将氢钟产生的 10 MHz 和 1 pps 信号传递到距离 200 km 左右的两个观测站. 本文针对上述沙漠环境下光纤时频传递系统的主要技术难点, 分析了链路中噪声的成分和来源, 重点研究了在时频稳相传输过程中, 反馈补偿带宽、补偿强度、光载波强度等系统参数对传递稳定度的影响, 得到了复杂实地链路环境下的光纤时频传递补偿反馈参数优化配置方案. 该光纤稳相时频传输系统在基于短基线干涉测量的卫星测轨系统中发挥了重要作用.

2 系统结构和实地链路噪声分析

我们的高精度时频传递系统所使用的实地光纤链路如图 1 所示, 通过两条光纤链路分别连接深空站 (deep space station) 与首区 (central station) 两个站点以及首区与新区 (outer station) 两个站点, 将置于深空站节点的氢钟时频信号向首区和新区两个站点传递, 使用的光纤为架空与埋地混合铺设的商用光纤, 且中间经过多个通信机房 (unicom room) 并在机房内通过法兰盘和 FC/PC 接头尾纤跳接, 其中一级链路为 180 km, 包含大约 40 km 架空光纤; 二级链路为 25 km 架空光纤. 一级链路沿路共有大约 20 个连接点, 总损耗达到 60 dB, 因此在中间放置了 3 台自研的低噪声掺铒光纤放大器 (EDFA) 来补偿链路传输损耗, 放置位置如图中红五角星表示. 鉴于一级链路长度远大于二级链

路, 因此对一级链路时频信号传输性能的描述更能反映极端复杂链路条件下的噪声抑制能力, 故以下将重点阐述对于一级长距离链路的时频传递相位噪声抑制和氢钟时频信号高精度传递结果.

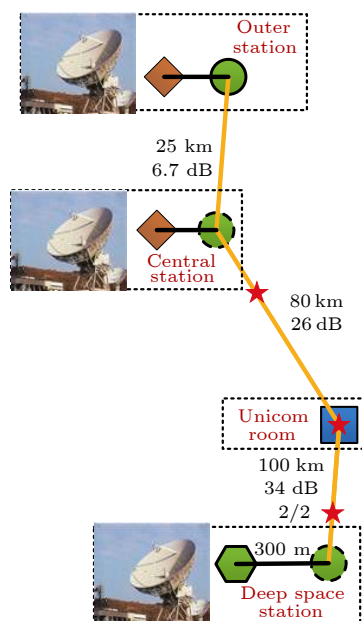


图 1 实地光纤链路铺设情况

Fig. 1. Schematic of urban fiber link.

高精度光纤时频传递系统如图 2 所示, 包含两级传递系统: 一级传递系统将深空站处的时频信号传到远端首区节点再生, 同时作为用户信号和往二级传递系统传递, 最终送往新区节点. 由于两级系统的组成结构和实现方式都是相同的, 在图 2 中只画出了一级系统结构, 本文也仅对一级系统做详细介绍. 将深空站节点处的氢原子钟的 10 MHz 正弦频率信号倍频到 1 GHz 后经过光发射端机调制到波长为 C37 的光波信号上, 采用更高的频率可以有效地提高传输的信噪比; 同时将本地端的 1 pps 时间信号调制到 C34 的光波信号上, 并通过波分复用技术经过环形器进入到光纤链路中. 到达远地端首区节点后, 通过探测器解调分别得到频率和时间信号, 一部分通过降频器降频作为时频信号输出给首区节点处的用户使用, 另一部分通过调制光波信号继续传递给下一级链路. 链路频率稳定度的测量是通过鉴相设备采集得到链路频率传输的相位差抖动数据, 并对相关数据进行统计分析可以得到噪声的阿伦方差表征. 由于在实地外场实验中, 受实际条件的限制, 本地端和远地端的时频信号处于不同的物理位置, 难以直接评估远地端与本地端时

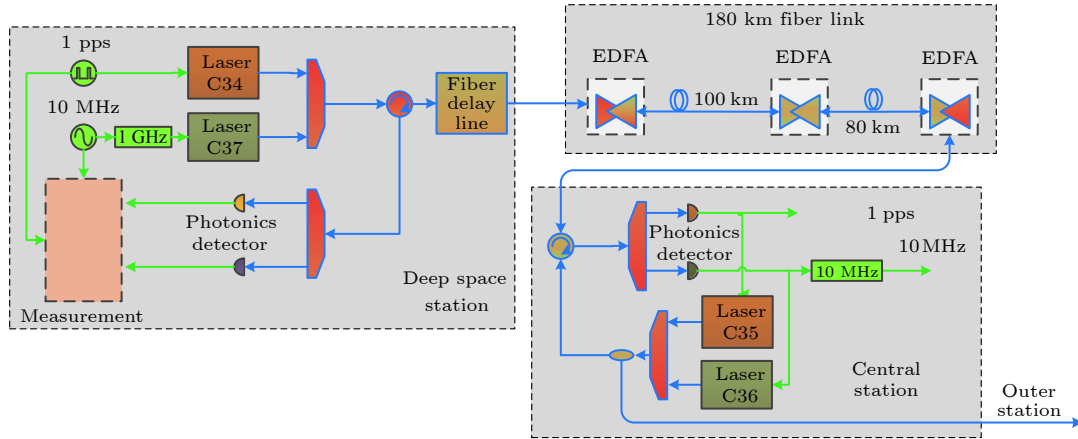


图 2 高精度光纤时频传递系统

Fig. 2. Schematic diagram of the frequency transfer and time synchronization system.

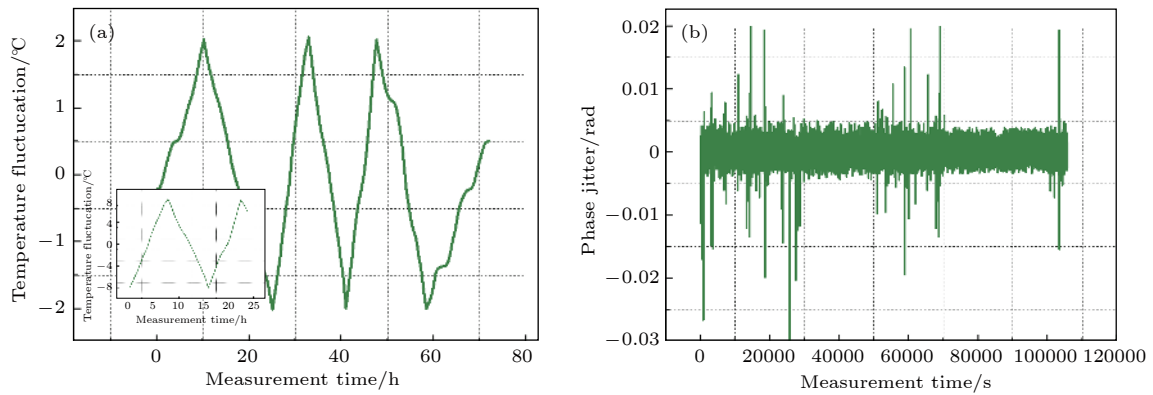


图 3 (a) 环境温度波动测量结果; (b) 频率相位快速抖动噪声

Fig. 3. (a) Environmental temperature vibration; (b) fast frequency phase jitter noise.

频信号的相对波动, 因此通过中心站测量本地频率和远端环回频率的相位稳定性来评估时频传递系统的性能. 而关于此系统的对称性我们在实验室条件下做过细致的验证, 验证结果表明中心站的测量结果足够表征远端频率的相位稳定性.

由于实地链路同时包含架空及埋地光缆, 会受到室外风力、地表振动等多种干扰, 噪声来源非常复杂, 因此在详细研究不同系统补偿反馈参数对于链路噪声的抑制能力前, 需要对链路噪声成分做一些半量化的系统分析, 从而为提出抑制室外复杂实地链路噪声的光纤时频传递补偿反馈参数配置方案提供数据支撑.

首先, 为了对反馈补偿系统的动态范围进行有效设计, 需要了解整体光纤链路随环境变化而产生的长时间时延漂移. 在实验中, 将时频传递系统置于开环测试环境, 通过相位分析, 测量频率信号的相对相位漂移, 根据光纤相位与温度的关系, 反演出作用在光纤链路上的温度波动, 测试结果如

图 3(a) 所示. 由于 180 km 光纤中有 140 km 是埋地光缆, 因此 180 km 整体光纤温度平均变化范围较小, 为 4 °C 左右, 对应时延变化范围为 24 ns 左右. 然而 40 km 架空光缆的昼夜温差大于 16 °C, 这反映了沙漠环境下温差变化大的特征, 如图 3(a) 内插图所示. 为此, 设计了一款中心风道散热的温控延迟线, 如图 4(a) 所示. 在兼顾体积与功耗的前提下, 得到了较大的时延变化范围. 在此结构设计的基础上, 一个 5 km 的温控延迟线可以具有 7 ns 以上的时延动态范围, 这样通过 6 组 5 km 温控延迟线的组合, 得到了大于 42 ns 的时延动态变化范围, 其时延变化测试结果如图 4(b) 所示, 保证了对于环境变化引起的长时间时延漂移的足量补偿.

其次, 在室外光纤链路的情况下, 除了由温度变化带来的大范围缓慢时延漂移外, 还存在着由于风力、机械振动等引起的频率相位快速抖动. 将系统置于仅有温控延迟线的弱反馈补偿环境下, 以便观察链路中的快速相位抖动噪声, 实验结果如

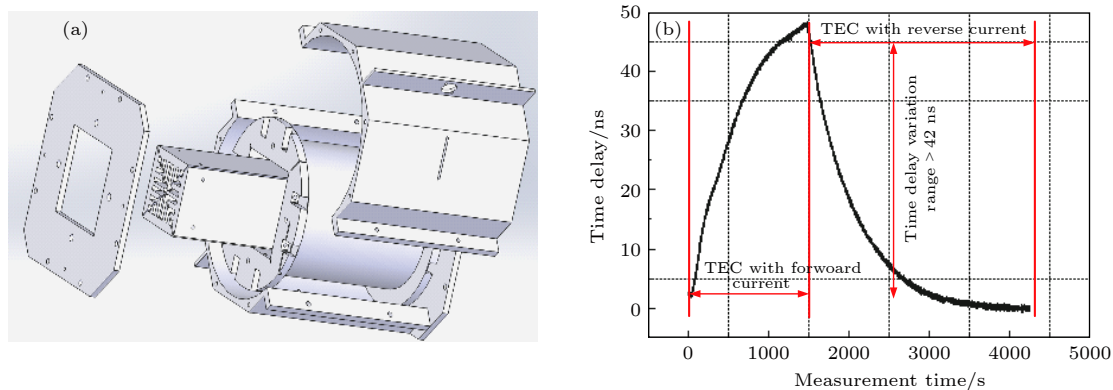


图 4 (a) 温控延迟线构造示意图; (b) 5 km 温控延迟线性能测试结果

Fig. 4. (a) Construction of fiber delay line; (b) test result of fiber delay line.

图 3(b) 所示. 由图 3(b) 可见, 在长时间的缓慢相位抖动漂移被温控延迟线成功抑制的情况下, 系统还存在着大量的相位快速抖动噪声, 根据相位与时延的换算关系, 可知此类快变噪声带来的时延变化幅度在 10 ps 左右. 对于此类噪声, 设计了压电陶瓷 (PZT) 延迟线, 通过快速拉伸改变光纤长度来实现补偿, 其响应速度达到 kHz 量级, 补偿范围约为 17 ps.

此外, 对于时间信号而言, 由于时间信号和频率信号经过相同的光纤链路, 光纤延迟线在稳定频率信号的同时, 也抑制了链路噪声对于时间信号的影响, 但由于时间与频率传递采用了不同的激光频率, 链路噪声对时间信号和频率信号的影响仍存在差异. 我们之前的研究表明 200 km 链路产生的残余信号抖动小于 20 ps^[19], 远小于 1 pps 信号自身产生的抖动, 据此可以认为本文系统同时实现了时间与频率信号的稳相传输.

基于以上分析, 下文主要详述频率信号传递的相位抖动噪声抑制及高精度时频信号传递结果. 通过详细研究不同系统补偿反馈参数对于链路噪声的抑制能力, 来重点探究得到能有效抑制室外复杂实地链路噪声的光纤时频传递补偿反馈参数配置方案.

3 光纤时频传递补偿反馈参数配置方案研究

通过上文分析可知, 由于实地链路环境扰动的噪声来源非常复杂, 因此本文以下将详细描述不同系统补偿反馈参数对于链路噪声的抑制能力. 重点研究在沙漠等极端条件下影响光纤时频传输系统

性能的限制因素, 探索其中的关键技术难点, 得到有效抑制室外复杂实地链路噪声的光纤时频传递补偿反馈参数配置方案, 为未来满足战场条件或恶劣环境条件下的高精度长距离时频同步需求提供可能的解决方法.

首先, 由于链路中噪声成分的复杂性, 需要精细地调整补偿系统的反馈强度和带宽, 力求得到最好的链路噪声抑制效果. 在反馈强度方面, 通过改变温控延迟线的工作电流来进行反馈强度的改变, 相关的实验结果如图 5 所示. 由图 5(a) 蓝线可见, 当慢变延迟线工作电流较低时, 相位波动中存在很多抖动噪声无法被有效地抑制. 这是由于在较低的工作电流时, 温控延迟线的升降温速率较慢, 因此当链路中噪声带来的时延抖动速率大于延迟线的最快补偿速率时, 就会在相位波动曲线中形成一个尖峰; 而随着慢变延迟线工作电流的增加, 抖动噪声被更好地抑制, 如图 5(a) 黑线所示. 将得到的相位抖动数据计算得到阿仑方差, 如图 5(b) 所示. 由图 5(b) 可见, 通过调整慢变延迟线工作功率, 低于 1 Hz 傅里叶频率的低频噪声得到不同程度的抑制, 这和慢变延迟线的补偿带宽也是一致的. 此外, 在实验中发现进一步提高慢变延迟线的工作电流已经不能得到更好的相位抖动抑制结果, 这说明此时图 5 中残余的相位抖动噪声的带宽已经大于慢变延迟线的补偿范围. 而过大的慢变延迟线工作电流反而会对延迟线自身带来更大的散热压力, 因此针对我们所应用的具体链路环境, 优化设定慢变延迟线工作电流为 1.6 A. 当链路所处环境温度特性发生改变时, 需要对于不同的实际环境实地优化温控电流设置值, 以取得最佳的效果. 目前也正在研究自适应的时频系统补偿方案, 基本原理是通过反

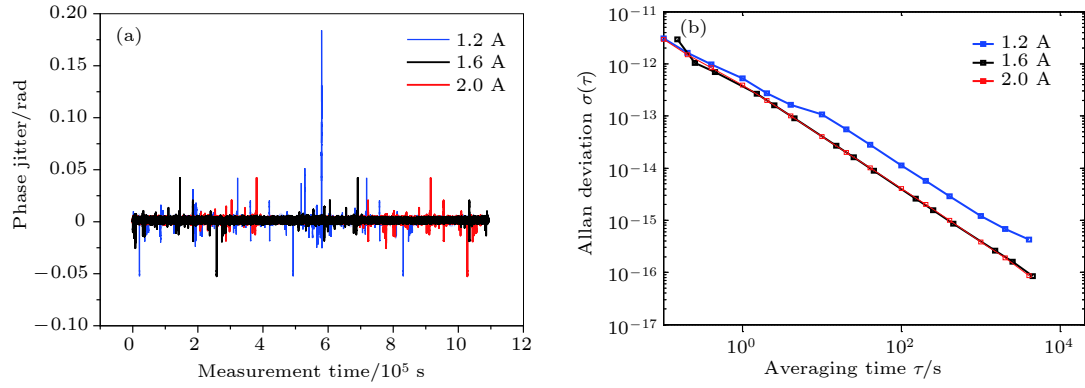


图 5 (a) 不同延时线工作电流下的相位抖动; (b) 不同延时线工作电流下的阿伦方差

Fig. 5. (a) Phase jitter for different delay line's working current; (b) the Allan deviation for different delay line's working current.

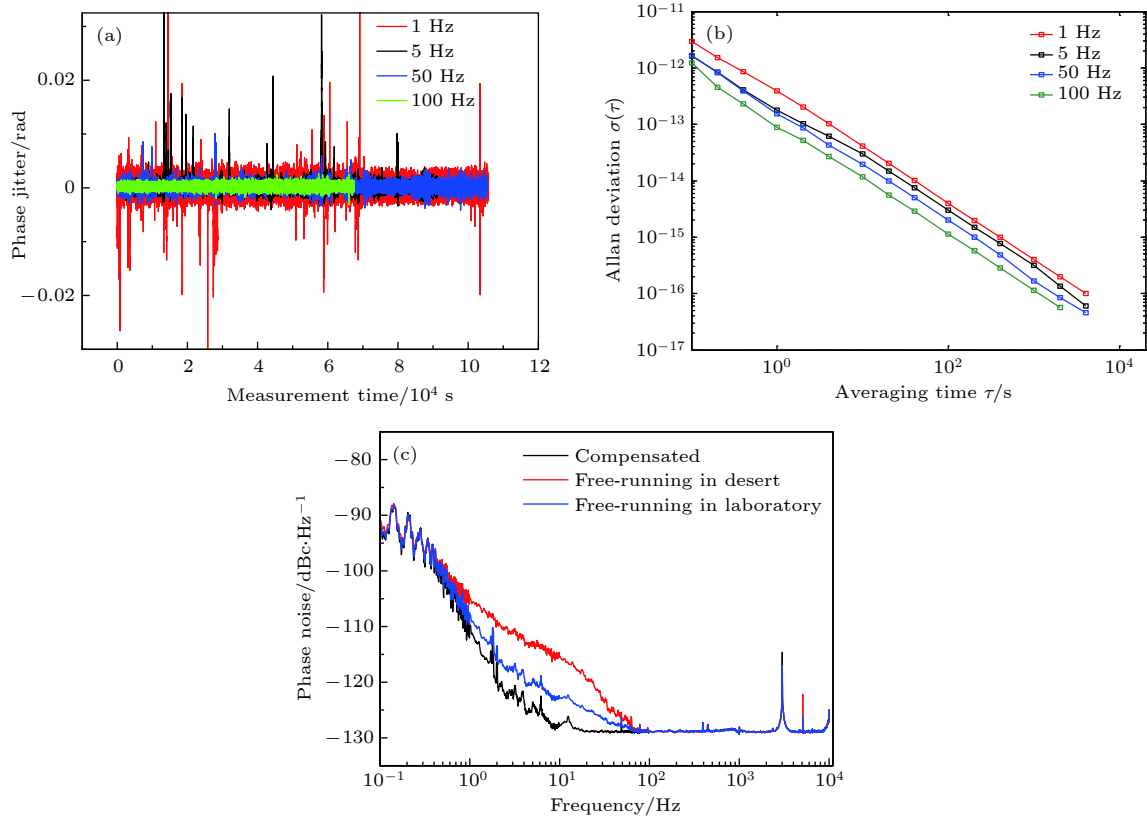


图 6 (a) 不同反馈带宽下的相位抖动噪声; (b) 不同反馈带宽下的噪声阿伦方差; (c) 不同情况下的链路相噪测试结果

Fig. 6. (a) Phase jitter in different feedback bandwidth; (b) the Allan deviation in different feedback bandwidth; (c) phase noise in different conditions.

馈模块的误差信号变化值感知链路中的时延变化, 并通过时延变化量的大小和快慢设置最佳的温度延迟线电流设置值, 以提升系统的实用性.

其次, 对于图 5(a) 中残余链路相位抖动噪声, 可以由更高时延补偿带宽的快速光纤 PZT 延时线进行补偿. 在实验中, 通过在反馈控制程序中加入特定的固有程序延时来得到不同的补偿带宽, 并观察不同补偿带宽下相位抖动噪声抑制后的情况, 实

验结果如图 6 所示. 由图 6(a) 可见, 随着反馈补偿带宽的不断加大, 链路中存在的快速相位抖动噪声不断地被抑制; 而另一方面, 链路中的补偿带宽应小于 $1/4t$ (t 为单向传输时延), 否则会引入额外的噪声^[20]. 更进一步地, 在远端通过降频及锁相净化技术得到 10 MHz 频率信号, 由于电子锁相环的有限带宽 (<100 Hz), 锁相带宽外的高频噪声不会引入到恢复频标信号中. 因此结合不同补偿带宽下的

实验结果与 180 km 的链路传输距离, 通过反馈控制程序的精确控制, 将系统补偿带宽优化调整为 100 Hz. 系统参数优化配置后得到的噪声抑制效果如图 6(a) 绿线所示. 由图 6(b) 可见, Allan 方差在补偿带宽内呈现了良好的 $1/\tau$ 特征, 说明链路抖动噪声得到了很好的抑制, 随着补偿带宽的逐渐提高, 最终得到的链路抖动噪声在全测试带宽下都呈现了 $1/\tau$ 特征. 为了更进一步地明确沙漠环境下的光纤链路快变噪声成分以及我们的补偿系统对于链路的快变相位噪声的抑制效果, 对频率信号的相位噪声进行了测试, 结果如图 6(c) 所示. 由图 6(c) 可以看出, 在沙漠环境下, 其室外光纤链路在 100 Hz 以下频率的相噪比在实验室内光纤链路要高很多, 而当采用合理的反馈补偿方案对链路相位抖动进行补偿反馈时, 其在补偿带宽内 (100 Hz) 的相位抖动噪声被很好地抑制了 (如图 6(c) 黑线所示), 这进一步说明了本文的反馈补偿方案实现了对于沙漠环境下链路复杂噪声的有效抑制.

最后, 如前文所述, 我们通过放置 3 台自研的低噪声掺铒光纤放大器来补偿链路光功率的传输损耗. 更进一步地, 掺铒光纤放大器的增益倍数必须合理地设置, 过小的光功率会使远端的信号解调过程带来较大的噪声, 过大的光功率也会带来额外的非线性效应和散射噪声. 在实验中, 通过光纤放大器的增益系数的改变实现对光纤链路的光功率管理并详细测试了不同链路光功率下得到的频率相位抖动噪声, 实验结果如图 7 所示. 在实验中, 光纤放大器均工作在自动功率控制模式, 即通过调整增益倍数, 使得在光纤放大器的输入光功率在 -25 dBm 至 -15 dBm 范围时, 输出的放大后光功率稳定在一个固定值. 由图 7 可见, 当链路中光功率较大时, 会激发非线性效应的散射噪声, 由此产生较大的相位抖动噪声; 而当链路中光功率较小时, 探测器解调信号过程中进入探测器光功率较低, 又会由于探测器的热噪声和散粒噪声得到较低的信噪比. 因此结合本文实验结果和分析, 通过对光纤放大器增益倍数的精确调整, 我们将通过自动功率控制技术将光纤放大器的输出稳定在 5 dBm 左右, 得到最低的链路相位抖动噪声. 此外由于 EDFA 器件本身的发热特性, 因此在实验中通过采取散热片和风扇共同散热的方式, 将它对频率长期稳定性的影响降到最低.

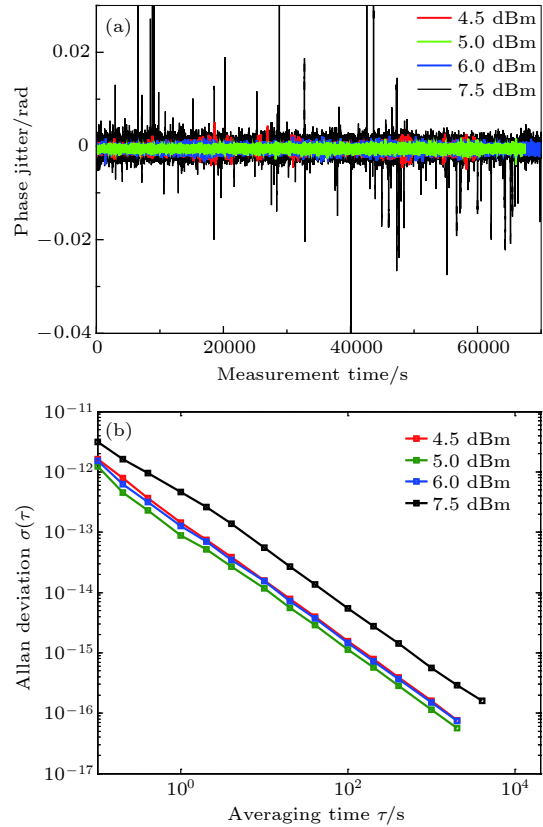


图 7 (a) 不同链路光功率下的相位抖动噪声; (b) 不同链路光功率下的噪声阿伦方差

Fig. 7. (a) Phase jitter in different link optical powers; (b) the Allan deviation in different link optical powers.

4 200 km 沙漠环境实地链路高精度时频传递性能

针对实际光纤链路环境, 通过上述对复杂链路噪声反馈补偿系统的优化配置, 获得噪声抑制前后的频率信号阿伦方差和 1 pps 信号的时间方差, 如图 8 所示. 在链路自由状态下, 由于链路途经高速公路、桥梁, 且架空线较多, 受到复杂环境波动的影响, 频率信号的秒稳定度约为 9×10^{-12} , 链路受到温度波动的影响更为显著, 表现为频率信号传递的千秒稳定度仅为 1×10^{-14} . 从时延抖动偏差来看, 长期稳定度随着时间的推进不断劣化, 千秒尺度下的时间方差约为 344 ps. 当系统进入噪声抑制状态时, 频率信号传递的短期稳定度和长期稳定度都有了显著的改善, 秒稳定度可达 8×10^{-14} , 长期稳定度进入 10^{-17} 量级, 与此同时, 千秒尺度的时间方差仅为 1.2 ps. 在超过 200 km 的沙漠环境实地光纤链路中, 氢钟信号远距离传输后由传输链路带来的不稳定度远低于氢钟信号自身的频率稳定度, 因此实现了氢钟信号在极端环境条件下的长距离

无损传输,可以满足对于氢钟信号远距离频率同源和时间同步应用的需求,如在基于短基线干涉测量系统中对于各观测站之间的时频同步应用。

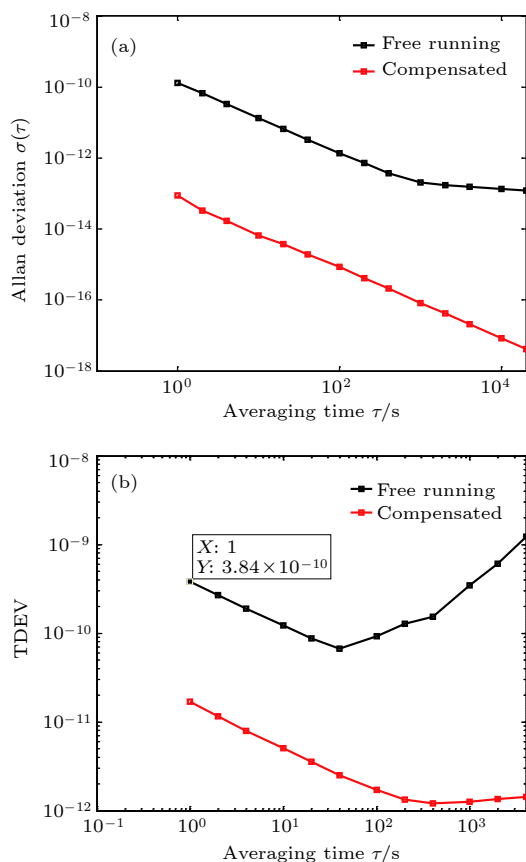


图 8 (a) 反馈补偿前后的相位噪声阿伦方差; (b) 反馈补偿前后的时延抖动偏差

Fig. 8. (a) The Allan deviation in free running and compensated conditions; (b) time deviation (TEDV) in free running and compensated conditions.

5 结 论

综上所述,本文针对沙漠实地光纤链路环境下光纤时频传递存在的架空光缆长、温度变化大、噪声来源复杂、光功率损耗大等主要技术难点,系统地研究了在时频稳相传输过程中反馈补偿带宽、补偿强度、光载波强度等系统参数对传递稳定度的影响。通过优化配置合适的反馈补偿动态范围和补偿带宽,并对光纤中光功率的精确控制,整个链路的频率稳定度达到 $8 \times 10^{-14}@1\text{ s}$, $1 \times 10^{-16}@1000\text{ s}$,

千秒尺度的时间方差也达到 1.2 ps. 实现了在长距离商用链路中高精度氢钟信号的无损传递,该光纤稳相时频传输系统在基于短基线干涉测量的卫星测轨系统中发挥了重要作用。

参考文献

- [1] Jiang Y Y, Ludlow A D, Lemke N D, Fox R W, Sherman J A, Ma L S, Oates C W 2011 *Nat. Photon.* **5** 158
- [2] Bloom B J, Nicholson T L, Williams J R, Campbell S L, Bishof M, Zhang X, Zhang W, Bromley S L, Ye J 2014 *Nature* **506** 71
- [3] Dong G X, Lin J D, Zhang S, Deng J L, Wang Y Z 2017 *Acta Opt. Sin.* **37** 0702001 (in Chinese) [董功勋, 林锦达, 张松, 邓见辽, 王育竹 2017 *光学学报* **37** 0702001]
- [4] Kippenberg T J, Holzwarth R, Diddams S A 2011 *Science* **332** 555
- [5] Udem T, Holzwarth R, Hänsch T W 2002 *Nature* **416** 233
- [6] Li Y, Lin Y G, Wang Q, Yang T, Sun Z, Zang E J, Fang Z J 2018 *Chin. Opt. Lett.* **16** 051402
- [7] Fu X H, Fang S, Zhao R C, Zhang Y, Huang J C, Sun J F, Xu Z, Wang Y Z 2018 *Chin. Opt. Lett.* **16** 060202
- [8] Masao T, Hong F L, Ryoichi H, Hidetoshi K 2005 *Nature* **435** 321
- [9] Tseng W, Lin S, Feng K, Fujieda M, Maeno H 2010 *IEEE Trans. Ultrason. Ferr.* **57** 161
- [10] Tal D, Octavio MP, Lev T, Jeff H 2010 *Nature* **463** 326
- [11] Lewandowski W, Azoubib J, Klepczynski W J 1999 *Proc. IEEE* **87** 163
- [12] Wang Y Q. 2004 *J. Astron. Metrol. Meas.* **24** 1 (in Chinese) [王义超 2004 *宇航计测技术* **24** 1]
- [13] Krehlik P, Sliwczynski L, Buczek L, Lipinski M 2012 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **61** 2844
- [14] Lopez O, Haboucha A, Chanteau B, Chardonnet C, Amy-Klein A, Santarelli G 2012 *Opt. Express* **20** 23518
- [15] Droste S, Ozimek F, Udem T, Predehl K, Hansch T W, Schnatz H, Grosche G, Holzwarth R 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 110801
- [16] Liu Q, Han S L, Wang J L, Feng Z T, Chen W, Cheng N, Gui Y Z, Cai H W, Han S S 2016 *Chin. Opt. Lett.* **14** 070602
- [17] Liu Q, Han S L, Wang J L, Feng Z T, Chen W, Cheng N, Gui Y Z, Cai H W, Han S S 2016 *Chin. J. Lasers* **43** 0906001 (in Chinese) [刘琴, 韩圣龙, 王家亮, 冯子桐, 陈炜, 程楠, 桂有珍, 蔡海文, 韩申生 2016 *中国激光* **43** 0906001]
- [18] Wang B, Gao C, Chen W L, Miao J, Zhu X, Bai Y, Zhang J W, Feng Y Y, Li T C, Wang L J 2012 *Sci. Rep.* **2** 556
- [19] Chen W, Cheng N, Liu Q, Wang J L, Feng Z T, Yang F, Han S L, Gui Y Z, Cai H W 2016 *Chin. J. Lasers* **43** 0706001 (in Chinese) [陈炜, 程楠, 刘琴, 王家亮, 冯子桐, 杨飞, 韩圣龙, 桂有珍, 蔡海文 2016 *中国激光* **43** 0706001]
- [20] Foreman S M, Holman K W, Hudson D D, Jones D J, Ye J 2007 *Rev. Sci. Instrum.* **78** 021101

Key technology of high-precision time frequency transfer via 200 km desert urban fiber link^{*}

Ying Kang¹⁾ Gui You-Zhen²⁾ Sun Yan-Guang^{1)†} Cheng Nan²⁾ Xiong Xiao-Feng¹⁾
Wang Jia-Liang²⁾ Yang Fei¹⁾ Cai Hai-Wen¹⁾

1) (*Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

2) (*Key Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

(Received 11 November 2018; revised manuscript received 9 January 2019)

Abstract

The precise time and frequency signal dissemination has significant applications in scientific research such as baseline interferometry, deep space network and metrology. Aside from satellite based systems, optical fiber has become an attractive alternative medium for transferring time and frequency signals, offering much improved accuracy. For the urban fiber link in the desert environment, there are many complex noise sources, such as temperature change, outdoor wind and ground vibration. Therefore, a systematical study on the noise source and on the noise reduction method in the dessert environment have practical significance. In this paper, we demonstrate a time (1 pps) and frequency signal dissemination and time synchronization system through a 200 km urban fiber in dessert environment. The noise source of the urban fiber under dessert environment is analyzed and studied in detail; the results show that the vibration and temperature shift are the major influencing factors. The vibration of urban fiber can induce the noise in the high Fourier frequency, and the temperature shift of urban fiber can induce the noise at a low Fourier frequency. An optical compensation setup is used, including the optical delay line with temperature controlled and piezoelectric ceramics driving. The phase fluctuation of frequency signal is detected and used to control the feedback of the optical compensating setup. In order to compensate for the fiber loss in a long range, a special bi-directional erbium-doped fiber amplifier is used to regenerate optical signals to achieve the long distance transmission. Then, we study the effective link noise suppression technology under different feedback compensation parameters. The systematic feedback parameters are optimized through using the different system feedback bandwidths, feedback intensities, optical power and other key parameters. The optimized systematic feedback parameters are obtained via the careful experimental observation and discussion. With the optimized systematic feedback parameters, experimental results show that the frequency stabilities are up to 8×10^{-14} at 1 s and 1×10^{-16} at 1000 s, and time stabilities are up to 1.2 ps in an average time of 10^3 s. The phase stabilized transmission of hydrogen clock signal in the 200 km level desert environment urban fiber link is realized. The verification experiment plays an important role in measuring the satellite orbit based on a connected elements' interferometry. The relevant study result is of significance for improving the precision of time and frequency signal dissemination in the dessert environmental urban fiber.

Keywords: fiber optics, time and frequency transfer, wavelength division multiplexing, optical compensation

PACS: 06.30.Ft, 42.81.-i, 52.70.gw

DOI: 10.7498/aps.68.20182000

^{*} Project supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDB 21030200), the Shanghai Sailing Program, China (Grant No. 18YF1426100), and the Natural Science Foundation of Shanghai, China (Grant No. 18ZR1444300).

[†] Corresponding author. E-mail: ygsun@siom.ac.cn