

# 基于本地测量的双向光学相位比对方法

曹 群<sup>1,2,3</sup>, 邓 雪<sup>1,3</sup>, 臧 琦<sup>1,2,3</sup>, 焦东东<sup>1,3</sup>, 刘 杰<sup>1,3</sup>, 许冠军<sup>1,3</sup>,  
高 静<sup>1,3</sup>, 刘 涛<sup>1,3</sup>, 张首刚<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院国家授时中心, 陕西 西安 710600;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>3</sup>中国科学院时间频率基准重点实验室, 陕西 西安 710600

**摘要** 为了更好地实现远程光钟之间的高精度比对,对意大利 Calosso 小组所提出的光纤双向光学相位比对方案进行了拓展,提出了一种基于本地测量的双向光学相位比对方法。同源的两路光信号从同一光纤两端注入,其中一路光信号经光纤传输到远端后经反射原路返回本地端,另一路光信号从远端经光纤传输至本地端。两个信号均在本地端与参考光进行拍频,将拍频得到的两路拍频信号的相位进行比对。利用这种结构,系统不需要有源光纤相位噪声补偿也可以消除叠加在光纤链路上的共模相位噪声,该结构的最大优势在于拍频信号的采集和处理均可以在本地端完成,不需要引入额外的时间同步信号来保证两地拍频信号采集同步进行,简化了实验系统。计算分析了该方案的相位噪声极限,并建立了基于 60 km 缠绕光纤的示范系统来进行测试,测得其秒级频率稳定度为  $1.45 \times 10^{-16}$ , 千秒稳定度达到  $1.51 \times 10^{-19}$ 。该方案有望用于远程光钟和其他原子钟之间更可靠的高精度频率比对。

**关键词** 光纤光学; 双向光学相位比对; 远距离光学相位传递; 本地端测量

**中图分类号** TN929.11

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.0504004

## Two-Way Optical Phase Comparison Method Based on Local Measurement

Cao Qun<sup>1,2,3</sup>, Deng Xue<sup>1,3</sup>, Zang Qi<sup>1,2,3</sup>, Jiao Dongdong<sup>1,3</sup>, Liu Jie<sup>1,3</sup>,  
Xu Guanjun<sup>1,3</sup>, Gao Jing<sup>1,3</sup>, Liu Tao<sup>1,3</sup>, Zhang Shougang<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710600, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>Key Laboratory of Time and Frequency Standards, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710600, China

**Abstract** In order to realize high precision comparison between remote optical clocks, the two-way optical phase comparison scheme proposed by the Calosso group in Italy is extended, and a two-way optical phase comparison method based on local measurement is proposed. Two optical signals which come from the same laser source are injected from two ends of the same optical fiber. One signal transmits to the far end through the optical fiber and then returns to the local end by reflection. The other signal transmits from the far end to the local end through the optical fiber. In this way, the two signals are beaten at the local end with the reference light to obtain the phases of the two beat signals. In this case, the common-mode phase noise induced by fiber links can be eliminated without the active fiber phase noise compensation. The most important advantage is that the acquisition and the processing for beat frequency signal can be done at the local end without adding extra time synchronous signal to ensure the synchronization of beat frequency signal acquisition, which simplifies the experimental system. The ultimate phase noise performance of the scheme is calculated, and a demonstration system based on 60 km spool fiber is

**收稿日期:** 2017-01-23; **收到修改稿日期:** 2017-02-08

**基金项目:** 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB21030800)、国家自然科学基金(91636101)、国家重点研发计划(2016YFF0200200)、国家自然科学基金青年科学基金(11403031)

**作者简介:** 曹 群(1991—),女,硕士研究生,主要从事光纤时间频率传递方面的研究。E-mail: 309850021@qq.com

**导师简介:** 刘 涛(1976—),男,博士,研究员,主要从事光纤时间频率传递和超窄线宽激光器方面的研究。

E-mail: taoliu@ntsc.ac.cn(通信联系人)

established. The frequency instability are  $1.45 \times 10^{-16}$  for 1 s and  $1.51 \times 10^{-19}$  for 1000 s. The scheme is expected to be used for more reliable high precision frequency comparison among remote optical clocks and other advanced atomic clocks.

**Key words** fiber optics; two-way optical phase comparison; remote optical phase transfer; local end measurement

**OCIS codes** 060.2310; 060.2330; 140.3510

## 1 引 言

精密测量是现代科学技术发展的基础,其中高精度时间频率对于一个国家的科技、经济、军事和社会生活至关重要,其应用范围从基础科研拓展到了工程应用领域,直接关系到民生根本。信息时代对高精度时间频率服务的稳定度、可靠性等提出了更高的要求。如今随着光纤通信技术的日趋成熟,利用远距离光纤链路进行光频传输和时间同步的方法展现出了较大的精度优势和应用前景,世界上多个国家如德国<sup>[1]</sup>、法国<sup>[2]</sup>、中国<sup>[3-7]</sup>和日本<sup>[8]</sup>等均已开展相关领域的研究并取得较大突破。目前光纤传输光频信号的稳定度已达到每天  $10^{-20}$  量级<sup>[9]</sup>。光纤频率传输的高精度为多个领域的研究提供了可能性,例如使用光纤链路取代卫星双向时间传递技术进行远距离时间比对。近年来光钟研究取得了重大突破,其频率稳定度和不确定度均已达到每天  $10^{-18}$  量级<sup>[10-15]</sup>。传统的卫星时间频率信号的远距离传输方案的传输稳定度只能达到每天  $10^{-16}$  量级<sup>[16]</sup>,该精度已无法满足高精度远程光钟之间比对的要求。因此,可以考虑采用光纤光学频率比对技术进行远距离光钟之间的比对。

2014年意大利 Calosso 小组提出了光纤双向光学相位比对的思想<sup>[17]</sup>。在该方案中,利用分光比为 50:50 的单模耦合器将一台激光器的输出光分为两路,并使用这两路光模拟位于异地的两台激光器。两台激光器同时向相对端发送光信号,到达两端的传输光同时完成其与本地参考光之间的拍频,因这两个光信号在光纤中仅相向传播一次,假设两个传播方向上叠加在往返光纤链路上的相位噪声相等,同步相位比对使得叠加在光纤链路上的共模相位噪声得以消除,从而得到了  $10^{-21}$  量级的万秒频率稳定度。该方案的特点是在系统中配置两个跟踪直接数字合成器(tracking DDS)测量光纤两端的光相位<sup>[18]</sup>,从而提高了系统的稳定度与可靠性。同年,法国 Bercy 小组基于上述原理提出了双向光学频率比对的实验方案<sup>[19]</sup>,使用频率计数器采集拍频信号的频率信息并进行频率比对,其万秒频率稳定度也达到  $10^{-21}$  量级。

虽然这两种方案均完成了高精度比对,但是存在以下问题:Calosso 小组引入了数字控制电路,电学部分实现较复杂;Bercy 小组的方案在异地比对的时候也存在一定的局限性,因为分别位于本地端与远端的频率计数器需要额外的时间同步信号去触发才能实现同步计数,若无法保证同时性,则会引起两端频率信号采集不同步,无法通过相减的操作消除链路相位噪声,从而影响比对精度。

本文通过分析上述双向光学相位比对方案,提出了一种基于本地测量的双向光学相位比对方案,即在本地端设置单个光电探测器,便可以得到远端光与本地光的拍频信号,也可测得本地光传输一个回路后的返回光与本地光的拍频,此时在一个地点就能获取比对所需要的所有数据,规避了异地测量仪器之间的时间同步问题,在一个地点就可以实现数据的采集和处理等操作。因此,本方案的数据采集既不涉及复杂的电路设计,也不依赖于异地测量仪器之间的时间同步,结构简单,系统稳定度高,成本低,在远程光钟之间的精准比对和高分辨率光学相位比对中发挥着重要作用。

## 2 基本原理

### 2.1 基于本地测量的双向光学相位比对实验原理

在所提方案中,通过双向光学信号的同步传输,在未加入主动相位噪声补偿的前提下,较好地消除了叠加在双向光纤上的共模相位噪声,而且本地端与远端的光信号均在本地端完成其与本地参考光的拍频,通过对这两个拍频信号的相位比对,即可得到高精度的相位比对结果。

具体实验结构示意图如图 1 所示,其中 Lab 1 为本地端,Lab 2 为远端,AOM 为声光调制器,FM 为法拉第旋转镜,PD 为光电探测器。以一台自制的线宽为 1.9 Hz、波长为 1550 nm 的超窄线宽激光器<sup>[20]</sup>作为光源,光源发出的光经过分光比为 50:50 的分束器分为两束,用以模拟处于异地的两个激光器。为了降低实验

系统中反射光对激光器的影响,在激光器后加入隔离度为 50 dB 的光隔离器,保证了激光器输出光的单向传递,避免因反射光功率过大而损伤激光器。两台激光器分别位于长距离光纤的两端,其输出的光信号在同根光纤上相向传播,其中 laser 2 的输出光分别经过 AOM 1(调制频率为  $f_1$ )和 AOM 2(调制频率为  $f_2$ )后进入 Lab 1,其中 AOM 的作用是便于从寄生反射光中分辨出有用信号。该传输光将与经 FM 1 反射后的 laser 1 参考光进行合束拍频,拍频信号由 PD 测得,其频率为  $f_1 + f_2$ ,可记作  $PD_A$ 。同时,laser 1 的信号光经 AOM 移频进入 Lab 2 后又经 FM 2 反射原路返回 Lab 1,该光信号与 laser 1 的参考光进行合束拍频,拍频信号可由 PD 测得,其频率为  $2(f_1 + f_2)$ ,可记作  $PD_B$ 。该方案使用单个 PD 接受两个不同频率的拍频光,为了分辨出这两个拍频信号,将该信号使用分束器分为两路,然后分别滤出两路信号滤波。为了消除反射光的相互作用对拍频结果的影响,AOM 1 与 AOM 2 的频点应避免呈倍数关系,并将光路中的连接点进行熔接,尽量避免光信号在连接点的插入损耗和反射。此时, $PD_B$  信号的产生是由 laser 1 在光纤链路上往返传输后拍频产生的,因此该信号的相位信息包含 2 倍的单程链路相位噪声,对其进行 2 倍分频后,该信号与  $PD_A$  信号携带了相同倍数的链路共模相位噪声。通过对这两个信号进行滤波放大等操作后,将这两个信号送入相位噪声分析仪(5125A)的输入端和参考端进行相位测量,因 5125A 内部可通过运算实现输入端信号与参考端信号之间的比相,因此可直接得到接入的两路信号的相位差。该结构可有效消除叠加在光纤链路上的共模相位噪声,以实现两台激光器之间的高精度相位比对。

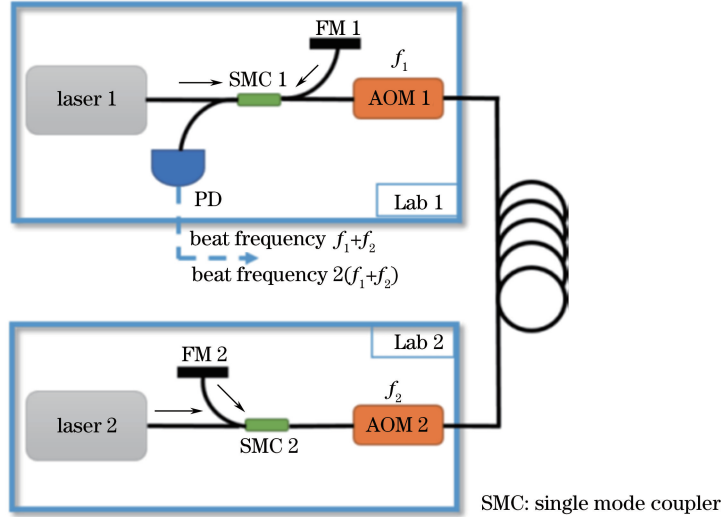


图 1 基于本地测量的双向光学相位比对方案实验结构示意图

Fig. 1 Experimental structure scheme of two-way optical phase comparison based on local measurement

## 2.2 基于本地测量的双向光学相位比对系统相位噪声分析

结合图 1 对该系统进行相位噪声分析,PD 探测到的两个信号  $PD_A$ 、 $PD_B$  所包含的相位噪声成分  $\varphi_A$ 、 $\varphi_B$  可分别表示为

$$\varphi_A = \varphi_2 + \varphi_{AOM2} + \varphi_{21} + \varphi_{AOM1} - \varphi_1 = (\varphi_2 - \varphi_1) + \varphi_{AOM1} + \varphi_{AOM2} + \varphi_{21}, \quad (1)$$

$$\varphi_B = \varphi_1 + \varphi_{AOM1} + \varphi_{12}(t - \tau) + \varphi_{AOM2} + \varphi_{AOM2} + \varphi_{21} + \varphi_{AOM1} - \varphi_1 = 2(\varphi_{AOM1} + \varphi_{AOM2}) + \varphi_{12}(t - \tau) + \varphi_{21}, \quad (2)$$

式中  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  分别为激光器 1、2 的相位噪声; $\varphi_{AOM1}$ 、 $\varphi_{AOM2}$  分别为 AOM 1 和 AOM 2 所引入的相位噪声; $\varphi_{12}$ 、 $\varphi_{21}$  分别为不同传播方向叠加在光纤链路上的共模相位噪声; $t$  为时间; $\tau$  为单程光纤链路的时延, $\tau = L/c_n$ ,其中  $c_n$  为光在光纤中的传播速度, $L$  为光纤的长度。为了验证该方案的理论极限,实验中采用一个激光源,通过分光比为 50:50 的分束器模拟异地激光器,在理想情况下,可以忽略 laser 1 与 laser 2 的相位噪声差异,因此  $\varphi_2 - \varphi_1 = 0$ ,为了抵消共同项,将上述两式联立,则双向光学相位比对的相位噪声可表示为

$$\varphi_{two}(z, t) = \varphi_A - \frac{1}{2}\varphi_B = (\varphi_2 - \varphi_1) + \frac{1}{2}\varphi_{21} - \frac{1}{2}\varphi_{12}(t - \tau) = \frac{1}{2}[\varphi_{21} - \varphi_{12}(t - \tau)]. \quad (3)$$

共模相位噪声  $\varphi_{12}$ 、 $\varphi_{21}$  会随着光的传播而逐渐累积,因此当光信号经过时间  $t$  传播到  $z$  位置时所叠加的

光纤相位噪声为

$$\varphi_{12}(z, t) = \int_0^L \delta\varphi \left[ z, t - \left( \tau - \frac{z}{c_n} \right) \right] dz, \quad (4)$$

$$\varphi_{21}(z, t) = \int_0^L \delta\varphi \left( z, t - \frac{z}{c_n} \right) dz, \quad (5)$$

式中  $\varphi(\cdot)$  为该传播方向上叠加在光纤链路的共模相位噪声,  $\delta$  为积分单元运算符。将上述(4)、(5)式代入(3)式, 可将(3)式化简为

$$\varphi_{\text{two}}(z, t) = \int_0^L \delta\varphi \left( z, t - \frac{z}{c_n} \right) dz - \frac{1}{2} \int_0^L \delta\varphi \left[ z, t - \left( 2\tau - \frac{z}{c_n} \right) \right] dz - \frac{1}{2} \int_0^L \delta\varphi \left( z, t - \frac{z}{c_n} \right) dz. \quad (6)$$

(6)式为双向比对相位噪声的时域表达式, 利用傅里叶变换的性质, 将时域表达式转换为频域表达式, 则(4)、(5)式在频域的表达式可分别表示为

$$\bar{\varphi}_{12}(z, \omega) = \int_0^L \exp \left[ -j\omega \left( \tau - \frac{z}{c_n} \right) \right] \delta\bar{\varphi}(z, \omega) dz, \quad (7)$$

$$\bar{\varphi}_{21}(z, \omega) = \int_0^L \exp \left( -j\omega \frac{z}{c_n} \right) \delta\bar{\varphi}(z, \omega) dz, \quad (8)$$

式中  $\bar{\varphi}_{12}(z, \omega)$ 、 $\bar{\varphi}_{21}(z, \omega)$  分别为  $\varphi_{12}(z, t)$ 、 $\varphi_{21}(z, t)$  的频域表达式,  $\omega$  为频率,  $\bar{\varphi}(z, \omega)$  为  $\varphi(z, t)$  的频域表达式。对(6)式作傅里叶变换后的频域表达式为

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}_{\text{two}}(\omega) &= \frac{1}{2} \int_0^L \exp \left( -j\omega \frac{z}{c_n} \right) \delta\bar{\varphi}(z, \omega) dz - \int_0^L \exp \left[ -j\omega \left( 2\tau - \frac{z}{c_n} \right) \right] \delta\bar{\varphi}(z, \omega) dz = \\ &= \frac{1}{2} \int_0^L \exp(-j\omega\tau) \left\{ \exp \left[ j\omega \left( \tau - \frac{z}{c_n} \right) \right] - \exp \left[ -j\omega \left( \tau - \frac{z}{c_n} \right) \right] \right\} \delta\bar{\varphi}(z, \omega) dz. \end{aligned} \quad (9)$$

根据  $\sin x = [\exp(jx) - \exp(-jx)] / (2j)$ , 则(9)式可改写为

$$\bar{\varphi}_{\text{two}}(\omega) = \int_0^L \exp(-j\omega\tau) \left\{ j \sin \left[ \omega \left( \tau - \frac{z}{c_n} \right) \right] \right\} \delta\bar{\varphi}(z, \omega) dz. \quad (10)$$

相位噪声谱密度(PSD)的定义为  $S(\omega) = \langle |\bar{\varphi}(\omega)|^2 \rangle$ 。由于光纤的不同位置受到独立噪声源的影响, 光纤中传播的光信号的相位噪声与所在位置不相关, 因此需要得到一个光纤单元的 PSD, 再将其在光纤全长上进行积分<sup>[21]</sup>。假设一个光纤单元的 PSD 可表示为

$$dS_{\text{fiber}}(\omega, z) = \langle \delta\bar{\varphi}(\omega, z)^2 \rangle, \quad (11)$$

式中  $S_{\text{fiber}}(\omega, z)$  为光纤的 PSD。对(11)式在整根光纤上积分可得

$$S_{\text{fiber}}(\omega, z) = \int_0^L \langle |\delta\bar{\varphi}(\omega, z)|^2 \rangle dz = L \times dS_{\text{fiber}}(\omega, z). \quad (12)$$

同理可得, 双向光学相位比对的 PSD 可以表示为

$$S_{\text{fiber, two}}(\omega) = \frac{S_{\text{fiber}}(\omega)}{L} \int_0^L \langle \left| j \sin \left[ \omega \left( \tau - \frac{z}{c_n} \right) \right] \right|^2 \rangle dz. \quad (13)$$

由于  $\sin^2 x = [1 - \cos(2x)] / 2$ , 可将(13)式化简为

$$\begin{aligned} S_{\text{fiber, two}}(\omega) &= \frac{S_{\text{fiber}}(\omega)}{L} \int_0^L \frac{1}{2} \left\{ 1 - \cos \left[ 2\omega \left( \tau - \frac{z}{c_n} \right) \right] \right\} dz = \\ &= \frac{S_{\text{fiber}}(\omega)}{2L} \left[ L - \frac{L}{2\omega\tau} \sin(2\omega\tau) \right] = \frac{S_{\text{fiber}}(\omega)}{2} [1 - \text{sinc}(2\omega\tau)]. \end{aligned} \quad (14)$$

式中  $\text{sinc}(x)$  的泰勒展开式为  $\text{sinc}(x) = 1 - x^2/3! + R_n(x)$ , 其中  $R_n(x)$  为余项, 是  $x$  的高阶无穷小, 可忽略不计。将泰勒展开式代入(14)式可得



$$S_{\text{fiber,two}}(\omega) = \frac{S_{\text{fiber}}(\omega)}{2} \times \left( 1 - 1 + \frac{4\omega^2 \tau^2}{3!} \right) = \frac{S_{\text{fiber}}(\omega)}{3} \omega^2 \tau^2. \quad (15)$$

因为  $\text{sinc}(0) \approx 1$ , 因此在低频处叠加在光纤上的相位噪声可以通过光信号的双向传播得到较好的抑制, 在高频处该相位噪声大约为单路相位噪声的 1/2。上文指出该相位噪声的 PSD 与所在位置不相关<sup>[21]</sup>, (15) 式成立的条件为  $4\pi f\tau \ll 1$ 。综上所述, (15) 式的表达式与具有主动相位噪声补偿的光纤光频传输方案的 PSD 表达式相同, 即所提出的基于本地测量的双向光学相位比对方法抑制光纤共模相位噪声的效果与使用闭环控制进行光纤相位噪声补偿的方案相当。因所提方案不涉及闭环锁定, 提高了系统的频率稳定性和可靠性, 且所需的光学、电路器件少, 结构简单, 成本低, 有望成为一种更可靠的应用于远距离光钟或其他原子钟之间的高精度频率比对方法。

### 3 实验结果与分析

为了验证该方案的理论极限, 搭建了基于 60 km 实验室光纤的示范系统, 并进行系统性能的测试。此时 PD 输出两个射频信号, 分别是频率为  $f_1 + f_2$  的单程拍频信号与频率为  $2(f_1 + f_2)$  的往返拍频信号。将往返拍频信号进行 2 倍分频后转化为频率为  $f_1 + f_2$  的射频信号, 该信号可视为携带了单程光纤相位噪声的拍频信号。进行该示范系统的频率稳定性测试时, 将该信号与光电探测器输出的频率为  $f_1 + f_2$  的单程拍频信号相比对, 通过放大、滤波等操作后接入 5125A, 采样时间设定为 1 ms。使用阿伦方差(ADEV)表征该测试结果, 基于 60 km 的本地端测量双向光学相位比对方案的频率稳定性, 结果如图 2 所示, 测试结果显示所提方案的单程自由运转(蓝色三角形曲线)的秒级频率稳定度仅为  $3.6 \times 10^{-14}$ , 而双向光学相位比对(红色正方形曲线)的秒级频率稳定度为  $1.45 \times 10^{-16}$ , 千秒稳定度达到  $1.51 \times 10^{-19}$ 。

该示范系统的 PSD 测试结果如图 3 所示, 由于测量仪器的限制, 并非同时测得频率为  $f_1 + f_2$  的单程拍频信号的相位噪声(蓝色曲线)与频率为  $2(f_1 + f_2)$  的往返拍频信号的相位噪声(红色曲线), 因此其曲线的重合度并不高。测量双向光学相位比对系统的相位噪声(黑色曲线)时, 两路信号的同步性高度一致, 从图 3 中可以看出其曲线在 1~1000 Hz 频率范围内较平缓, PSD 约为  $1 \times 10^{-5} \text{ rad}^2/\text{Hz}$ 。因此该方案的系统性能能够满足远距离光钟之间的比对需求。

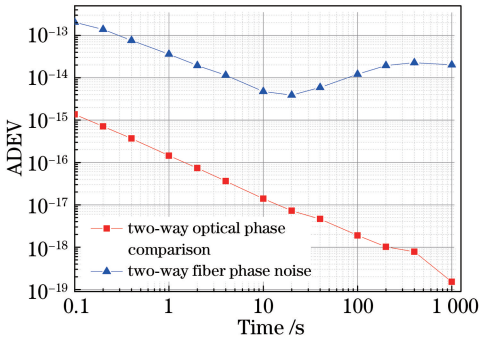


图 2 基于本地测量的双向光学相位比对方案的阿伦方差

Fig. 2 Allan deviation of two-way optical phase comparison based on local measurement

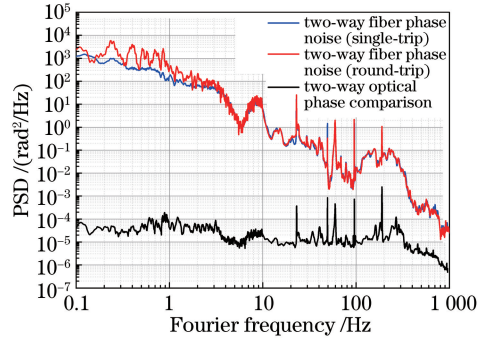


图 3 基于本地测量的双向光学相位比对方案的 PSD

Fig. 3 PSD of two-way optical phase comparison based on local measurement

### 4 结 论

介绍了一种基于本地测量的双向光学相位比对方案, 通过推导系统相位噪声的极限, 并用 60 km 实验室光纤搭建了示范系统, 测试了该系统的频率稳定性和相位噪声性能。实际测试系统的秒级频率稳定度为  $1.45 \times 10^{-16}$ , 千秒稳定度为  $1.51 \times 10^{-19}$ , 该系统性能可以满足远距离光钟之间的高精度比对需求。该方案对光纤链路的相位噪声不敏感, 光路中不包含复杂的有源光纤相位噪声控制环路, 提高了系统的可靠性, 与 Calosso 小组、Bercy 小组的实验方案相比, 其优势在于既不涉及复杂的数字电路设计, 也规避了多个异地仪

器的同步触发问题,简化了电路的复杂度,优化了实验步骤,降低了实验成本。这种基于本地测量的双向光学相位比对方案有望用于多个站点远程光钟或其他原子钟之间的高精度比对,为将来的基础科研、各国实验室的时钟校准、高科技应用等领域提供强大的技术支持。

## 参 考 文 献

- [1] Droste S, Ozimek F, Udem T, *et al.* Optical-frequency transfer over a single-span 1840 km fiber link[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(11): 110801.
- [2] Chiodo N, Quintin N, Stefani F, *et al.* Cascaded optical fiber link using the internet network for remote clocks comparison[J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 33927-33937.
- [3] Liu Jie, Gao Jing, Xu Guanjun, *et al.* Study of optical frequency transfer via fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(12): 120602.  
刘 杰, 高 静, 许冠军, 等. 基于光纤的光学频率传递研究[J]. *物理学报*, 2015, 64(12): 120602.
- [4] Zang Qi, Deng Xue, Cao Qun, *et al.* The optimized design of bi-EDFA for long distance optical frequency transfer link [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0306006.  
臧 琦, 邓 雪, 曹 群, 等. 用于长距离光频传递链路的双向 EDFA 优化设计[J]. *光学学报*, 2017, 37(3): 0306006.
- [5] Ma C Q, Wu L F, Jiang Y Y, *et al.* Optical coherence transfer over 50-km spooled fiber with frequency instability of  $2 \times 10^{-17}$  at 1 s[J]. *Chinese Physics B*, 2015, 24(8): 084209.
- [6] Wang Lingdong, Wu Guiling, Shen Jianguo, *et al.* Simultaneous transfer of time and frequency over 100 km fiber link [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0406004.  
王灵东, 吴龟灵, 沈建国, 等. 基于 100 km 光纤链路的时间和频率同时传递[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0406004.
- [7] Cheng Nan, Chen Wei, Liu Qin, *et al.* Time synchronization technique for joint time and frequency transfer via optical fiber[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(7): 0705002.  
程 楠, 陈 炜, 刘 琴, 等. 光纤时间频率同时传递系统中时间同步方法的研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(7): 0705002.
- [8] Musha M, Hong F L, Nakagawa K, *et al.* Coherent optical frequency transfer over 50-km physical distance using a 120-km-long installed telecom fiber network[J]. *Optics Express*, 2008, 16(21): 16459-16466.
- [9] Deng X, Liu J, Jiao D D, *et al.* Coherent transfer of optical frequency over 112 km with instability at the  $10^{-20}$  level [J]. *Chinese Physics Letters*, 2016, 33(11): 114202.
- [10] Schiller S, Tino G M, Gill P, *et al.* Einstein gravity explorer - a medium-class fundamental physics mission [J]. *Experimental Astronomy*, 2009, 23(2): 573-610.
- [11] Katori H. Optical lattice clocks and quantum metrology[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(4): 203-210.
- [12] Sherman J A, Lemke N D, Hinkley N, *et al.* High-accuracy measurement of atomic polarizability in an optical lattice clock[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(15): 153002.
- [13] Huntemann N, Okhapkin M, Lipphardt B, *et al.* High-accuracy optical clock based on the octupole transition in  $171 \text{ Yb}^+$  [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(9): 090801.
- [14] Swallows M D, Bishof M, Lin Y, *et al.* Suppression of collisional shifts in a strongly interacting lattice clock[J]. *Science*, 2011, 331(6020): 1043-1046.
- [15] Hinkley N, Sherman J A, Phillips N B, *et al.* An atomic clock with  $10^{-18}$  instability[J]. *Science*, 2013, 341(6151): 1215-1218.
- [16] 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.
- [17] Calosso C E, Bertacco E, Calonico D, *et al.* Frequency transfer via a two-way optical phase comparison on a multiplexed fiber network[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(5): 1177-1180.
- [18] Calosso C E, Bertacco E K, Calonico D, *et al.* Tracking DDS for coherent optical links[C]. 2013 Joint European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium, 2013: 14025751.
- [19] Bercy A, Stefani F, Lopez O, *et al.* Two-way optical frequency comparisons at  $5 \times 10^{-21}$  relative stability over 100-km telecommunication network fibers[J]. *Physical Review A*, 2014, 90(6): 061802.
- [20] Jiao Dongdong, Gao Jing, Liu Jie, *et al.* Development and application of communication band narrow linewidth lasers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(19): 190601.  
焦东东, 高 静, 刘 杰, 等. 用于光频传递的通信波段窄线宽激光器研制及应用[J]. *物理学报*, 2015, 64(19): 190601.
- [21] Osama Terra M S. Dissemination of ultra-stable optical frequencies over commercial fiber networks[D]. Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, 2010.