

# 光纤时频传递系统的中继技术分析

华 芸<sup>1</sup> 桂有珍<sup>1</sup> 杨 飞<sup>2</sup> 蔡海文<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学重点实验室, 上海 201800  
<sup>2</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息技术研究中心, 上海 201800)

**摘要** 为开展长距离高精度时间频率传输系统研究,对多级光纤时间频率传递级联系统的时延抖动进行理论分析,得出级联系统总时延抖动的一般公式。在实验上实现了两级级联 50 km 光纤时频传递系统的闭环锁定,分别通过测试单级系统和级联系统的鉴相误差电压得到其时延抖动。通过实验结果和理论计算比较,分析了主要实验误差来源;通过分析掺铒光纤放大器(EDFA)放大自发辐射(ASE)产生的噪声对信噪比(SNR)的影响,系统频率稳定度由于信噪比的下降而产生劣化。

**关键词** 光纤光学;时频传递;强度调制;时延抖动;光学放大器

**中图分类号** P127.1;TB939 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0905002

## Analysis of Repeater for Time and Frequency Dissemination via Optical Fiber

Hua Yun<sup>1</sup> Gui Youzhen<sup>1</sup> Yang Fei<sup>2</sup> Cai Haiwen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup>Research Center of Space Laser and Information Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

**Abstract** Based on the theoretical analysis of cascaded optical fiber time and frequency dissemination system, the general formula of total time jitter is calculated. A two-stages optical fiber link for ultra-stable frequency dissemination with a total fiber length of  $2 \times 50$  km is demonstrated. Then the phase error voltage and time jitter of single-stage and two-stage systems in closed-loop is measured. After comparing experimental results and theoretical calculation, the main sources of experimental error is analyzed. Analyze the impact of phase noise on signal to noise ratio (SNR), which the phase noise is caused by the amplified spontaneous emission (ASE) of the erbium-doped fiber amplifier (EDFA). The stability of transfer system is gotten due to the decline of signal to noise ratio (SNR).

**Key words** fiber optics; time and frequency dissemination; intensity modulation; time jitter; optical amplifier

**OCIS codes** 060.2360; 120.7000; 140.4480

## 1 引 言

高精度时间频率传递技术在多方面有着重要应用,如时间频率计量、基础物理、粒子加速器、天文学等<sup>[1,2]</sup>。现有高精度时间频率传递技术主要基于卫星实现,如 GPS 载波相位测量或卫星双向时间频率传递。这些方法能达到的频率不稳定度为每天

$10^{-15}$ ,时间同步精度达至亚纳秒量级<sup>[2]</sup>。随着原子钟、光钟的发展,基于卫星实现高精度时间频率传递已经不能满足频率标准的传递要求。利用光纤的损耗低、可靠性高以及抗干扰能力强等优点,光纤时间频率传递技术已经成为国际研究热点<sup>[3~10]</sup>。日本计量研究院(NMIJ)<sup>[3]</sup>采用射频调制光纤传输方式,

收稿日期: 2012-04-09; 收到修改稿日期: 2012-05-04

基金项目: 国家 863 计划(2010AA7010214,2011AA8113014)资助课题。

作者简介: 华 芸(1987—),女,硕士研究生,主要从事光纤时间频率传递技术方面的研究。E-mail: huayunxz@yeah.net

导师简介: 桂有珍(1976—),女,博士,副研究员,主要从事光纤时频传递、量子时频传递技术等方面的研究。

E-mail: yzgui@siom.ac.cn

完成传输距离为 160 km 光纤时频传递实验,  $10^5$  s 频率稳定度为  $8 \times 10^{-17}$ 。德国物理技术联邦研究院 (PTB) 采用直接传输光频率信号方式, 完成传输距离为 480 km 的光纤光频相干传递实验, 2 h 频率稳定度为  $2 \times 10^{-18}$ <sup>[5]</sup>。英国国家物理实验室 (NPL)<sup>[7]</sup> 采用传输频率梳方式完成 86 km 光纤时频传递实验, 1600 s 频率稳定度为  $4 \times 10^{-17}$ 。

为了获得较远的时频标准传输距离, 一般在传递系统中使用光学放大器对传输信号进行中继以补偿其衰减。但是另一方面, 在时频标准传输系统中, 信号会受到各种噪声的影响, 为了获得高的传递精度, 一般利用往返信号主动反馈回路<sup>[11]</sup>对传输噪声进行预先补偿, 而补偿带宽受限于传输链路的长度, 链路越长所能补偿的噪声带宽越窄<sup>[12]</sup>。因此在远距离高精度光纤时频标准传输系统中, 对信号中继并不能像光通信系统一样单一地通过级联很多掺铒光纤放大器 (EDFA) 来获得足够的增益, 以便传输很长的距离, 它需要开发新的信号中继方式。比如将级联 EDFA 和级联噪声抑制系统两种中继方式结合。本文设计了合适的单级噪声抑制传输距离, 在单级传输系统内独立地使用 EDFA 进行功率补偿和闭环噪声抑制, 然后级联多级这样的噪声抑制系统, 从而实现远距离高精度时频标准传递。针对这两种中继方式对传输系统性能的影响进行分析和验证。

## 2 噪声抑制系统级联对传输系统的影响

### 2.1 N 段传递系统时延计算

光纤时间频率传输系统的研究目的是保证在远地信号接收端能精确、可靠地重构出本地端发射的频率或时间参考信号。但是信号在整个传输过程中受到各种相位(频率)噪声干扰, 具体可以分为与测量系统有关的系统噪声(如频率信号源的相位噪声、射频电子闪烁噪声等)和由于线路本身的不稳定因素产生的相位噪声。这些相位噪声的累积影响系统的频率稳定度。文献<sup>[13~15]</sup>分析单级时频标准传递系统的噪声对稳定性和时延抖动的影响。本文分析得到了级联中继时频标准传递系统总时延抖动的一般表达式以及利用 EDFA 中继方式对频率稳定度的影响。

频率稳定性可以从两方面描述: 频域相位抖动功率谱密度 (PSD)  $S_{\phi}(f)$  和时域总均方根时间抖动

$T_{\text{rms}}$ 。其中相位抖动功率谱密度  $S_{\phi}(f)$  表达式为

$$S_{\phi}(f) = \frac{[\delta\phi(f)]^2}{B_w}, \quad (1)$$

式中  $B_w$  是测量带宽, 且  $B_w \ll f, 0 < f < \infty$ 。

总均方根时间抖动  $T_{\text{rms}}$  表达式为

$$T_{\text{rms}} = \sqrt{\int_{f_1}^{f_b} [\delta\tilde{T}(f)]^2 df}, \quad (2)$$

式中  $\delta\tilde{T}(f)$  表示时间抖动谱密度, 它正比于相位抖动谱密度  $\delta\tilde{\phi}(f)$ , 可表示为

$$\delta\tilde{T}(f) = \frac{\delta\tilde{\phi}(f)}{2\pi\nu_0}, \quad (3)$$

式中  $\nu_0$  表示传递过程中的中心频率。假设在频域频率微小变化的情况下, 相位抖动谱密度可以表示为

$$\delta\tilde{\phi}(f) = \phi(f) - \phi_{\text{th}}(f), \quad (4)$$

式中  $\phi(f)$  是受到扰动之后的相位,  $\phi_{\text{th}}(f)$  是理想状态下的相位。那么将 (3)、(4) 式代入 (2) 式可以得到总均方根 (RMS) 时间抖动的表达式为

$$T_{\text{rms}}^2 = \frac{1}{4\pi^2\nu_0^2} \int_{f_a}^{f_b} [\delta\tilde{\phi}(f)]^2 df, \quad (5)$$

式中积分的上下限由具体的频率标准传输应用场合来确定, 根据定积分的定义将积分区间  $[f_a, f_b]$  均分成  $n$  等分, 且  $n \rightarrow \infty$ , 每等分  $\frac{f_a - f_b}{n}$  用  $\Delta f$  表示, 有

$$T_{\text{rms}}^2 = \frac{1}{4\pi^2\nu_0^2} \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n [\phi_i(f) - \phi_{\text{th}}(f)]^2 \Delta f. \quad (6)$$

上面主要分析单个时间频率传递系统的时延抖动情况, 如果信号需要传输较长的距离, 几百甚至几千公里时, 必须考虑多个时间频率传递系统级联方案。假设有  $N$  段传输系统级联, 每段系统时延抖动均方根为  $T_i$ , 系统总均方根时延抖动为  $T_{\text{rms}N}$ 。

根据级联系统再生的误差传递模型, 各个传输节点的时延误差是独立无规的, 即每段传输系统中的相位噪声是随机相位噪声, 具有随机性。而不同段系统之间的相位噪声之间没有关系, 具有独立性。

一般测量过程中总是存在误差的影响, 假设测量时无系统误差, 仅有随机误差。用标准差  $\sigma$  来评定随机误差的尺度

$$\sigma^2 = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} (x_i - x_0)^2, \quad (7)$$

式中  $x_i$  表示第  $i$  次测量时的测量值,  $x_0$  表示真值。当系统存在多个随机误差时, 总误差为

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n a_i^2 \sigma_i^2 + \sum_{1 \leq i < j} a_i a_j \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j, \quad (8)$$



所示,其峰谷值(最大值-最小值)约为 40 ps;其次,单独测量第二级 50 km 光纤闭环时频传递系统,测量时间约 14 h,时延抖动曲线如图 2(b)所示,时延抖动峰谷值约为 70 ps;最后测量两级光纤时频传递闭环系统的鉴相误差电压,测量时间为 19 h,时延抖动曲线如图 2(c)所示,其峰谷值约为 120 ps。

从实验结果看出:闭环锁定后第一级 50 km 光纤时频传递系统的时延抖动误差约为 40 ps,第二级 50 km 光纤时频传递系统的时延抖动误差约为 70 ps,而两级系统级联后总时延抖动误差约为 120 ps。利用理论推导出的(9)式计算两级系统级联后总时延抖动误差应为 81 ps,造成实验和理论偏差的原因有两点:1) 由于测试条件的限制,单级系统指标和级联系统指标的测量是在不同时间进行的,系统状态和参数发生了一定变化会引入附加时

延抖动误差;2) 两级系统之间信号传输时由于阻抗不匹配、反馈带宽限制等原因引起的电学噪声也会引入附加时延抖动误差。下一步工作将针对上述原因做进一步分析研究。

### 3 光学放大器对传输系统的影响

放大器是光纤时频传递系统中必不可少的器件,以补偿信号在传输过程中的损耗。当采用射频频调制光纤时频传递方案时,常用放大器件是 EDFA。在系统中引入 EDFA 后,除了信号本身的噪声以及放大自发辐射(ASE)噪声外,还包括信号与 ASE 的拍频(S-ASE)噪声和 ASE 的自拍频(ASE-ASE)噪声。这里着重讨论 EDFA 中由于放大自发辐射造成的信噪比(SNR)对于传递系统频率稳定度的影响。首先噪声对于信噪比的影响为

$$R_{SN} = \frac{\langle n_{in} \rangle^2}{2Bm_t n_{sp} \gamma(G-1)\Delta f + 4B\langle n_{in} \rangle n_{sp} \gamma(G-1) + 2Bm_t n_{sp}^2 \gamma^2 (G-1)^2 \Delta f}, \quad (10)$$

式中  $n_{sp}$  为放大器的粒子反转参数,  $m_t$  为光放大器中引导横向模式的个数,  $B$  为探测器带宽,  $\gamma$  为放大器之间的链路衰减,  $G$  为放大器增益,  $\Delta f$  为 ASE 的带宽,  $\langle n_{in} \rangle$  为信号在探测器每单位时间内的平均光子数。分母中第一项表示 ASE 的散粒噪声,第二项表示 S-ASE 拍频噪声,第三项表示 ASE-ASE 拍频噪声。

计算 EDFA 噪声对于信噪比的影响:  $P_{in} = \langle n_{in} \rangle h\nu$  表示信号在探测器处的光功率,  $h$  是普朗克常量,  $\nu$  是光载波频率。设定  $n_{sp} = 2$ ,  $m_t = 2$ ,  $\Delta f = 100$  GHz,  $B = 1$  kHz,  $P_{in}$  分别取  $-10$  dBm 和  $0$  dBm,  $\gamma(G-1)$  取值在  $[-10$  dB,  $10$  dB] 范围内。由图 3 可以看出: EDFA 增益小于链路衰减时的信噪比大于 EDFA 增益大于链路衰减时的信噪比。当探测器探测功率

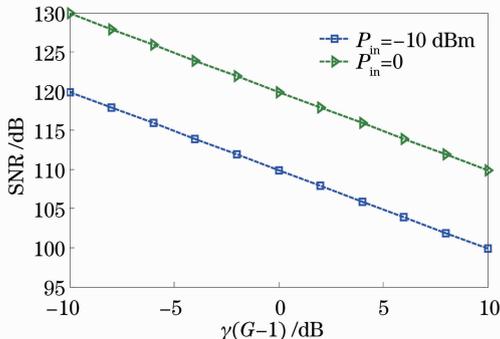


图 3 EDFA 噪声对信噪比的影响

Fig. 3 Impact of phase noise caused by EDFA on SNR

为  $0.1 \sim 1.0$  mW 时,若信号经 EDFA 的放大正好补偿链路中损耗,信噪比在  $110 \sim 120$  dB 之间;信号经过损耗放大之后的功率为初始信号的 10 倍时,信噪比在  $100 \sim 110$  dB 之间;信号经过损耗放大之后的功率为初始信号的  $1/10$  时,信噪比在  $120 \sim 130$  dB 之间。

为了确切知道信噪比与系统频率稳定度的关系,需要知道噪声分布的具体形式。一般假设噪声分布为白相位噪声<sup>[16]</sup>,可以得到信噪比与相对频率不稳定度的 Allan 方差的关系为

$$\sigma_y(\tau) = \frac{\sqrt{3}}{2\pi f_0 \tau m \sqrt{R_{SN}}}, \quad (11)$$

式中  $f_0$  为调制频率,  $\tau$  为积分时间,  $m$  为调制深度。

但是实际系统的噪声分布并不会在全频段都维持白相位噪声,往往还包含其他成分的噪声。比如白频率噪声和闪烁相位噪声等。考虑这些因素的存在,可以假设相对频率噪声分布为

$$S_y(f) = \frac{1}{f_0^2} (A + Bf + Cf^2), \quad (12)$$

式中  $A = \frac{f_d f_1}{2(f_1 - f_d)R_{CN}}$ ,  $B = \frac{1}{2\ln(f_2/f_1)R_{CN}}$ ,  $C = \frac{1}{2(f_h - f_2)R_{CN}}$ 。其中  $[f_d, f_1]$  频率段为白频率噪声,  $[f_1, f_2]$  频率段为闪烁相位噪声,  $[f_2, f_h]$  频率段为白相位噪声。  $R_{CN}$  为载波信号噪声比,根据文献[17]在模拟计算时做如下取值,  $f_d = 0$  Hz,  $f_1 =$

1 Hz,  $f_2 = 1$  kHz,  $f_h = 1$  MHz, 于是可以得到相对频率不稳定度的 Allan 方差为

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\frac{3}{4\pi^2 f_0^2 \tau^2 m^2 R_{SN}} + \frac{1.038 + 3\ln(2000\pi\tau)}{110.5\pi^2 \tau^2} \frac{2}{f_0^2 m^2 R_{SN}}}$$

(13)

图 4 表示信噪比变化对于频率稳定度的影响, 其中, 曲线 a 的噪声包括非相位白噪声, 曲线 b 的噪声都是白相位噪声。在信噪比相同的情况下, 相位噪声包括非白噪声分布时的相对频率稳定度的 Allan 偏差约是相位噪声均是白噪声分布时的 1.25 倍, 因此在一般的分析中可以不用考虑非白噪声成分的影响。

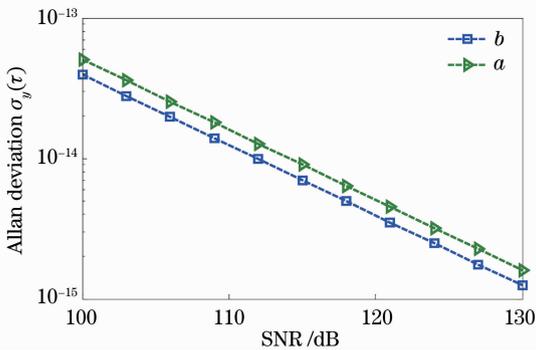


图 4 信噪比变化对频率稳定度的影响  
Fig. 4 Allan deviation of different SNR

通过以上分析可知, 根据传输系统对频率稳定度的指标要求, 可以通过图 4 反推得到系统最低信噪比, 再通过图 3 得到系统中继增益和衰减的匹配关系。例如, 系统的频率稳定度要满足  $\sigma_y(\tau) < 10^{-14}/s$ , 就需要信噪比大于 113 dB, 当取探测器的功率范围为  $-10 \sim 0$  dBm 时, 需要中继放大器的增益与后续链路衰减的乘积在  $[-2, 8]$  范围内。

## 4 结 论

本文从理论和实验上分析了级联噪声抑制系统和使用 EDFA 两种中继方式对时频传输链路稳定性的影响。理论上推导了  $N$  级光纤时间频率传递系统的总时延抖动公式, 得到总的时延抖动均方根的平方等于各级时延抖动均方根的平方和。然后搭建了两级 50 km 光纤闭环时间频率传递系统, 二级系统级联时总时延抖动是 120 ps, 单级系统时延抖动分别是 40 ps 和 70 ps, 分析了实验误差比理论值偏大的原因。最后分析了不同噪声分布形式下 EDFA 的 ASE 噪声对于信噪比和系统频率稳定度的影响, 通过对比发现在分析 EDFA 噪声对系统信

噪比的恶化时假设其分布形式是白相位噪声是合理的, 可以达到 80% 的近似度。以上结论对于在设计搭建高精度远距离时频传输系统时选择合适的中继方式有一定的指导意义。

## 参 考 文 献

- 1 J. Frisch, D. Bernstein, D. Brown *et al.*. A high stability, low noise RF distribution system [C]. Proc. Particle Accelerator Conf., 2002, **2**: 816~818
- 2 A. Bauch, J. Achkar, S. Bize *et al.*. Comparison between frequency standards in Europe and the USA at the  $10^{-15}$  uncertainty level [J]. *Institute of Physics Publishing, Metrologia*, 2006, **43**(1): 109~120
- 3 M. Amemiya, M. Imae, Y. Fujii *et al.*. System for precise dissemination of frequency standard via optical fiber [J]. *Electron. & Commun. Jpn.*, 2012, **95**(3): 45~54
- 4 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
- 5 O. Terra, G. Grosche, H. Schnatz. Brillouin amplification in phase coherent transfer of optical frequencies over 480 km fiber [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(15): 16102~16111
- 6 G. Marra, H. S. Margolis, D. J. Richardson. Dissemination of an optical frequency comb over fiber with  $3 \times 10^{-18}$  fractional accuracy [J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(2): 1775~1782
- 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 Lumin Zhang, Le Chang, Yi Dong *et al.*. Phase drift cancellation of remote radio frequency transfer using an optoelectronic delay-locked loop [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(6): 873~875
- 9 Zhang Fan, Hou Dong, Guo Haipeng *et al.*. Timing delay jitter compensation of a fiber link with active delay compensation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 671~675
- 张帆, 侯冬, 郭海鹏等. 光纤时间频率传输的时延抖动主动补偿 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 671~675
- 10 Lai Xianzhu, Zhang Baofu, Lu Lin *et al.*. Estimation of transmission delay in the accurate time transfer system based on optical link [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 170~173
- 赖先主, 张宝富, 卢麟等. 高精度光链路授时时延估算 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 170~173
- 11 Longsheng Ma, Peter Junger, Jun 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
- 12 F. Narbonneau, M. Lours, O. Lopez *et al.*. High resolution frequency standard dissemination via optical fiber metropolitan network [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, **77**(6): 064701
- 13 Dai Yufeng, Lu Lin, Wang Rong *et al.*. The analyses of stability of frequency transferred by fiber [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2010, **30**(1): 47~52
- 代玉峰, 卢麟, 王荣等. 光纤频标传递的稳定性分析 [J]. *宇航测试技术*, 2010, **30**(1): 47~52
- 14 Ding Xiaoyu, Lu Lin, Zhang Baofu *et al.*. Error analysis of fiber time service using round-trip method [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(4): 040603
- 丁小玉, 卢麟, 张宝富等. 光纤 Round-Trip 法授时误差分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(4): 040603
- 15 Dai Yufeng, Lu Lin, Wang Rong *et al.*. Emulate of stability of frequency transferred by fiber [J]. *China Measurement & Test*, 2009, **35**(5): 30~33

- 代玉峰, 卢麟, 王荣等. 光纤频标传递的稳定度仿真[J]. 中国测试, 2009, **35**(5): 30~33
- 16 M. Amemiya, M. Imae, Y. Fujii *et al.*. Precise frequency comparison system using bidirectional optical amplifiers [J]. *IEEE. Trans. Instrum. Meas.*, 2010, **59**(3): 631~640
- 17 S. M. Foreman, K. W. Holman, D. D. Hudson *et al.*. Remote transfer of ultrastable frequency references via fiber networks[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2007, **78**(2): 022201

栏目编辑: 宋梅梅