

基于相位波动远端补偿的微波频率光纤传递新方法

李得龙^{1,2} 卢麟^{1,*} 张宝富¹ 李晓亚¹ 滕义超¹

(¹ 解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)
(² 中国人民解放军 68302 部队, 陕西 渭南 714000)

摘要 为研究微波信号光纤传递的性能,提出了一种对相位波动在远端进行抵消补偿的微波信号光纤传递新方法。该方法利用法拉第旋转镜将远端返回的光信号再次反射至远端,对光纤链路因温度、压力变化引入的相位波动通过远端的倍频混频电路进行抵消补偿。理论仿真与验证实验证实了该方法的有效性。在微波调制频率为 1 GHz,光纤链路长度为 25.2 km 的实验中,频率传递的稳定度损失为 $2 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}$ 和 $6 \times 10^{-17} \text{ d}^{-1}$ 。此方法优化了本地端的结构,本地端不需要光-电-光转换,无需设计相位信息的精确测量与实时补偿系统,且光纤链路引入的相位扰动对长期稳定度的影响可以降低约三个数量级。

关键词 光通信;微波频率传递;频率稳定度;时延波动残留;光纤链路

中图分类号 TM935.11 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0706001

New Microwave Frequency Dissemination Method over Optical Fiber Based on the Phase Fluctuation Compensated at Remote Sites

Li Delong^{1,2} Lu Lin¹ Zhang Baofu¹ Li Xiaoya¹ Teng Yichao¹

(¹ Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China)
(² Troops 68302 PLA, Weinan, Shaanxi 714000, China)

Abstract In order to study the performance of microwave frequency transfer based on fiber link, a novel ultra-stable radio frequency dissemination system over optical fiber is proposed. The system utilizes a Faraday rotator mirror to reflect the optical signal back to remote sites, where the phase fluctuation introduced by temperature and pressure changes is counteracted by the frequency multiplier mixer circuit at remote sites. Its validity is tested through simulation and experiment. The transmission of 1 GHz signals over 25.2 km optical fiber is experimentally demonstrated, where relative stability of $2 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}$ and $6 \times 10^{-17} \text{ d}^{-1}$ is obtained. The main advantages of the proposed system are that the local sites structure is simplified, and the signal conversion of optical-electronic-optical and the phase fluctuation measurement and compensation systems can be removed at local sites. In addition, the fiber-induced phase noises can be suppressed by three orders of magnitude in the long-term.

Key words optical communications; microwave frequency dissemination; frequency stability; transfer delay fluctuation residual; optical fiber link

OCIS codes 060.2630; 060.3510; 120.3930

1 引言

高精度微波频率同步在许多关键领域中的应用日益突出,鉴于光纤具有低损耗、高稳定性、抗电磁

干扰能力强的特点,利用光纤链路传递高精度的微波频率已成为当前研究的热点^[1-5],其稳定度已达 10^{-18} d^{-1} 量级^[5-6]。

收稿日期: 2014-01-10; 收到修改稿日期: 2014-02-21

基金项目: 国家自然科学基金(61174199,61371121)

作者简介: 李得龙(1985—),男,硕士研究生,主要从事光纤时频传递方面的研究。E-mail: dleinstan@163.com

导师简介: 张宝富(1965—),男,教授,硕士生导师,主要从事微波光子学及光纤时频传递等方面的研究。

E-mail: zhangbaofu@163.com

* 通信联系人。E-mail: nj_lulin@163.com

目前基于光纤链路的频率传递主要采用往返相位校正理论(RTPC)补偿因时延波动而引起的相位波动。RTPC的核心是相位信息的精确探测和实时补偿,目前解决这一问题的主流方法是在本地端设计精确的相位测量与补偿系统^[7-9]。为提高测量与补偿的精度,许多技术已被提出,典型的方法有电延迟线法^[10]、数字鉴相移相法^[11]、基于压电陶瓷的光学真时延补偿法^[12]等。

本文提出了一种在远端对相位波动进行抵消补偿的频率传递新方法,仿真研究表明利用该方法可以有效减小外部环境温度变化对频率传递的影响,提高长期稳定度。在微波调制频率为 1 GHz,光纤链路长度为 25.2 km 的测试中,远端再生微波频率的稳定度损失为 $2 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}$ 和 $6 \times 10^{-17} \text{ d}^{-1}$ 。与传统方法相比,该方法在本地端采用一个法拉第旋

转镜,将从远端返回的光信号再次反射至远端,在远端利用倍频混频电路对光纤链路因温度、压力等变化引入的相位波动进行抵消补偿。其优势在于简化了系统结构,本地端不需要进行光-电-光转换,无需设计复杂的相位测量与补偿系统,且光纤链路因温度、压力等变化引入的相位扰动对长期稳定度的影响可以降低约三个数量级。

2 相位波动远端补偿的原理

在忽略光纤非线性和非互易性的前提下,可以认为光纤中相向传播的光信号在相同的路径中经历了相同的相位扰动^[13]。如果将传输到远端的光信号返回至本地端,用法拉第旋转镜再次反射至远端,则此光信号将经历三倍的相位扰动,其原理图如图 1 所示。

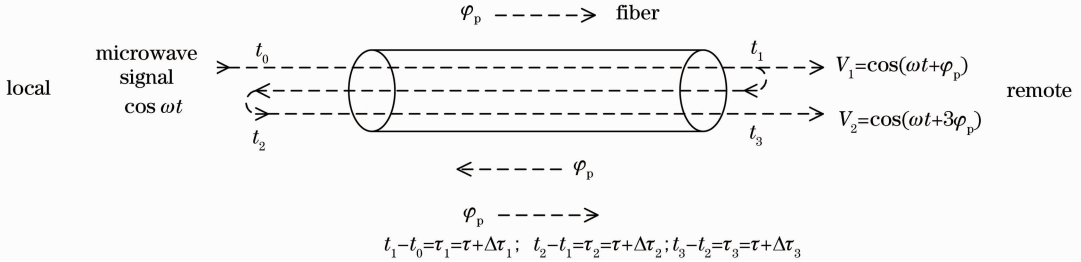


图 1 基于相位波动远端补偿的频率传递原理图及时序模型

Fig. 1 Simplified schematic of frequency transfer based on the phase fluctuation compensated at remote sites and the model time sequence

假设频标信号为 $\cos \omega t$, 光纤链路引入的相位扰动为 φ_p , 则由本地端传输到远端的光信号经光电转换后(记为 V_1) 经历的相位扰动为 φ_p , 部分光信号直接返回至本地端后经历的相位扰动为 $2\varphi_p$ 。将返回光信号经法拉第旋转镜再次反射至远端, 经光电转换后(记为 V_2) 经历的相位扰动为 $3\varphi_p$ 。将 V_1 三倍频, 其相位扰动为 $3\varphi_p$, 与 V_2 下变频混频, 中频输出信号的频率为 $2\omega t$, 光纤链路引入的相位扰动 φ_p 在混频过程中被相互抵消。

该方法的优势在于用远端的倍频混频电路取代了本地端的相位测量与补偿系统, 简化了系统的结构。不足之处在于光纤链路所处的外部环境处于动态变化中, 光信号在三次传递过程中引入的时延波动存在微小差异, 导致在抵消补偿时产生时延波动残留量, 引入额外的稳定度损失。

为研究时延波动残留对稳定度的影响, 根据时延波动与相位波动的关系^[14], 以时延波动为参考量建立时序模型。图 1 中 τ 是光纤链路的固有传播时延, 定义为 $\tau = nL/c$, 其中 n 为纤芯折射率, L 为光纤

链路的长度, c 为真空中的光速。 $\Delta\tau_1$ 、 $\Delta\tau_2$ 、 $\Delta\tau_3$ 分别表示光信号在光纤中三次传递时, 因光纤链路所处的外部环境变化而引起的时延波动量。光信号在 t_0 时刻由本地端送入长度为 L 的光纤链路, 在 t_1 时刻到达远端, 传递时间为 τ_1 , 则有 $t_1 = t_0 + \tau_1$; 其中部分光信号沿原路径返回, 在 t_2 时刻到达本地端, 传递时间为 τ_2 , 则有 $t_2 = t_0 + \tau_1 + \tau_2$; 返回的光信号由本地端经法拉第旋转镜再次送入光纤链路, 在 t_3 时刻到达远端, 传递时间为 τ_3 。由于光纤链路的温度处于动态变化中, 因此起始时刻分别为 t_0 、 t_1 、 t_2 时, 时延波动量 $\Delta\tau_1$ 、 $\Delta\tau_2$ 、 $\Delta\tau_3$ 之间存在微小差异, 将相位波动等效在时延波动上, 经抵消补偿后的时延波动残留可表示为

$$\Delta\tau_{\text{residual}} = \frac{3\tau_3 - (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3)}{2} = \Delta\tau_3 - \frac{(\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2)}{2}. \quad (1)$$

时延波动残留 $\Delta\tau_{\text{residual}}$ 是导致频率稳定度损失的主要因素。在往返相位校正理论中, 影响频率传递长期稳定度的主要因素是光纤链路温度变化引入

的时延波动^[7,10]。光纤的传播时延由纤芯折射率和链路长度决定,可表示为 $\tau_{\text{FIB}} = n \cdot L/c$, 长度 L 和折射率 n 均是温度的函数,传播时延波动可表示为^[10]

$$\frac{d\tau(t)}{dt} = \frac{n}{c} \cdot \frac{\partial L}{\partial T} \cdot \Delta T_e(t) + \frac{L}{c} \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T_e(t), \quad (2)$$

式中 $\Delta T_e(t)$ 表示光纤链路的温度随时间变化的函数,其可表示为^[15]

$$\Delta T_e(t) = \frac{\Delta T_c}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{P_c} t\right). \quad (3)$$

夏季日气温变化范围为 $15\text{ }^\circ\text{C} \sim 35\text{ }^\circ\text{C}$, 光纤链路温度变化的幅度 ΔT_c 取 $20\text{ }^\circ\text{C}$, P_c 表示环境温度的变化周期,取 86400 s 。光纤的热膨胀系数典型值为 $\alpha = 7 \times 10^{-6} (\text{ }^\circ\text{C})^{-1}$, 基于 Sellmeier 方程,由文献[16]计算可知,波长在 1550 nm 附近,折射率与温度呈近似线性关系,即有 $\partial n/\partial T = 1.0636 \times 10^{-5} (\text{ }^\circ\text{C})^{-1}$ 。由此可计算得在 100 km 光纤链路上的时延波动残留引入的频率稳定度损失的阿伦方差曲线如图 2 所示。图 2 中实线表示日气温变化幅度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时,单向频率传递、无任何补偿时的时延波动对频率传递稳定度的影响曲线,其长期稳定度约为 $1.2 \times 10^{-11}\text{ d}^{-1}$ 。点连线表示日气温变化幅度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时,利用该方法在远端对相位波动进行抵消补偿后的稳定度曲线,长期稳定度约为 $9.3 \times 10^{-19}\text{ d}^{-1}$,

相对于无补偿的情况,长期稳定度提高了 7 个数量级。当光缆埋地后,日气温变化对光纤链路的影响相应降低。虚线表示光纤链路的温度变化幅度为 $2\text{ }^\circ\text{C}$ 时,表示频率稳定度的阿伦方差曲线,其长期稳定度约为 $9.3 \times 10^{-20}\text{ d}^{-1}$ 。由以上分析可知,该方法可以有效补偿光纤链路因温度变化而引入的相位波动,提高频率传递的长期稳定度。

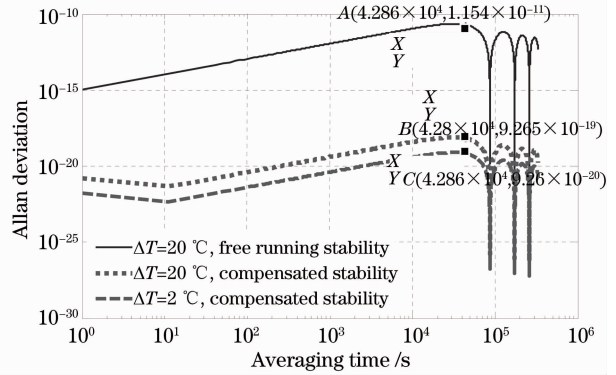


图 2 表示频率稳定度的阿伦方差仿真曲线
Fig. 2 Curves of Allan deviation of the impacts of frequency stability

3 基于相位波动远端抵消补偿实验

3.1 系统方案及原理

根据图 1 所示的原理,实验装置图如图 3 所示。

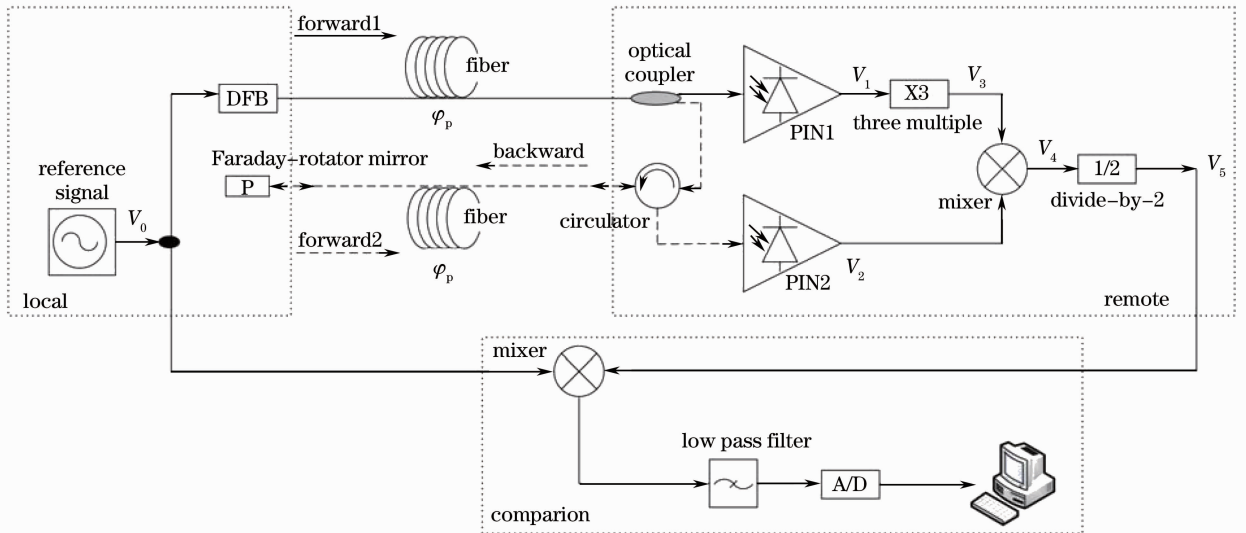


图 3 基于光纤链路的频率传递系统原理图

Fig. 3 Simplified schematic of the fiber based radio frequency dissemination system

在不考虑幅度的情况下,信号源输出的微波信号可以表示为

$$V_0 = \cos(\omega t + \theta_0), \quad (4)$$

式中 θ_0 为初始相位。经功率分配器后,一路信号用于比较端与远端再生信号混频,测试再生信号的稳

定度。另一路信号用于强度调制分布反馈式(DFB)激光器,被调制的光信号沿前向路径送入光纤链路。由于光纤链路受热效应、机械应力等因素的影响,在传播过程中引入 φ_{p1} 的相位扰动。到达远端后,一部

分光信号进入光电探测器(PIN1)端,恢复出的微波信号可表示为

$$V_1 = \cos(\omega t + \theta_0 + \varphi_{p1}). \quad (5)$$

另一部分光信号经光学环形器被送入另一盘等长的光纤,沿后向路径回传至本地端,传播过程中引入的相位波动为 φ_{p2} 。到达本地端后,光信号被法拉第光学旋转镜完全反射,再次沿前向路径送入光纤链路,传播过程中引入的相位扰动为 φ_{p3} 。到达远端后,在光电探测器(PIN2)端恢复出的微波信号可表示为

$$V_2 = \cos(\omega t + \theta_0 + \varphi_{p1} + \varphi_{p2} + \varphi_{p3}). \quad (6)$$

在环境温度变化对光纤链路的影响是一个缓变效应的前提下,忽略光纤的非互易性,可以认为光信号在前向路径和后向路径中传播经历的相位扰动是相等的,即 φ_{p1} 、 φ_{p2} 和 φ_{p3} 相等,简记为 φ_p 。此时光电探测器(PIN1)解调出的微波信号经放大、滤波、三倍频后可表示为

$$V_3 = \cos(3\omega t + 3\theta_0 + 3\varphi_p). \quad (7)$$

V_3 放大滤波后,与光电探测器(PIN2)恢复出的微波信号 V_2 进行混频,混频器中频端输出信号可表示为

$$V_4 = \cos(2\omega t + 2\theta_0). \quad (8)$$

V_4 没有携带任何额外的相位扰动。 V_4 经二分频器后的输出为

$$V_5 = \cos(\omega t + \theta_0). \quad (9)$$

V_5 的频率和相位均与 V_0 相同,由此可实现频率信号经光纤链路传递后,在远端无损再生。

3.2 实验结果分析

对图 2 所示的实验系统进行测试。本地端 1 GHz 微波参考信号由 Anritsu 公司的 MG3694B 信号源提供,为增强稳定度,采用铷原子钟(FS725)注入到信号源的 10 MHz 输入端。光源采用商用分布反馈式激光器,波长为 1555 nm。采用两盘长度为 25200 m 的 G. 652 光纤置于实验台上,光纤链路的温度与室内环境温度相同,日变化范围为 21 °C ~ 28 °C。为避免同一条光纤路径中相向传输的两路光信号受相干瑞利散射噪声的影响^[17],同时保证接收端光信号的信噪比^[18],实验过程中将激光器的输出光功率适当降低至 -2 dBm。测试端主要由混频器(mini-circuits ZX-05-63LH-S+)、低通滤波器(截止频率为 1.9 MHz)和模数转换器(A/D)组成。 V_0 和 V_5 混频后的输出为一个电压信号,经低通滤波器、A/D 采样,根据时延波动、相位波动与频率稳定度的关系^[14],将采样电压值转换为时延波动,计算

再生信号的相对频率稳定度。

为比较本方案的性能,对单向频率传递进行测试。被调制的光信号通过同一条光纤链路由本地端向远端传递,对传输过程中引入的相位波动不进行补偿,将采样电压转换为时延波动后的结果如图 4 所示,在 10000 s 的采样时间,时延波动约为 250 ps。采用本文提出的方法对相位波动在远端进行抵消补偿,相同条件下测得的时延波动小于 15 ps。因此,可知该方法对光纤链路中因温度变化而引发的时延波动可以得到有效补偿。

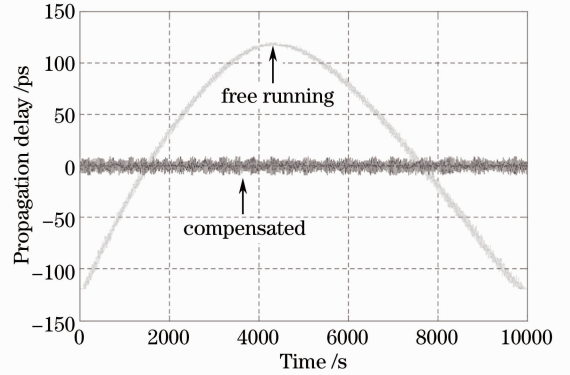


图 4 单向频率传递和利用本方案进行补偿的频率传递的时延波动曲线

Fig. 4 Measured transmission delay fluctuation curves of free-running fiber link and compensation fiber link

根据时延波动计算频率稳定度损失的阿伦方差曲线如图 5 所示。为便于比较,首先对微波信号源的稳定度进行测试。微波信号源输出的 1 GHz 信号被分为两路,分别接入比较端混频器的本振端和射频端,中频输出端经滤波、数字化采样后,稳定度损失的阿伦方差曲线如图 4 棱形实线,分别为 $6 \times 10^{-13} \text{ s}^{-1}$ 和 $8 \times 10^{-18} \text{ d}^{-1}$ 。单向无补偿的频率传递稳定度损失曲线如图 5 虚线所示,分别为 $3 \times$

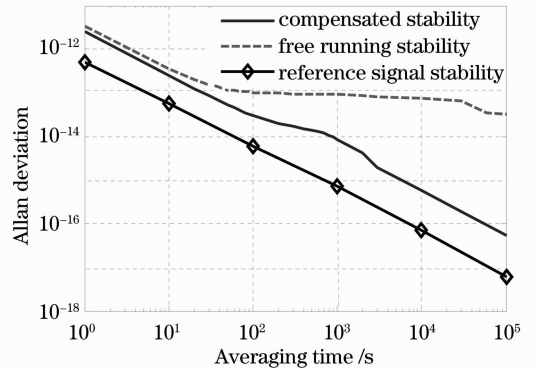


图 5 频率传递稳定度损失的阿伦方差曲线

Fig. 5 Curves of Allan deviation of the impacts of frequency stability

10^{-12} s^{-1} 和 $5 \times 10^{-14} \text{ d}^{-1}$ 。采用本方案对相位波动进行抵消补偿的频率传递稳定度损失曲线如图 5 实线所示,分别为 $2 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}$ 和 $7 \times 10^{-17} \text{ d}^{-1}$ 。与无补偿的情况相比较,长期稳定度提高约三个数量级,证实了本方案的有效性。

从图 5 可知,采用本方案进行频率传递,短期稳定度和长期稳定度均比微波参考信号降低了一个数量级,实验中采用普通商用蝶形封装 DFB 激光器,光源输出的稳定性不能保证,激光器波长的抖动和漂移会恶化频率传递的短期稳定度和长期稳定度。若电路系统中采用更好的商用器件则系统性能会得到整体提升。另外,在端系统上的短光纤跳线引入的时延波动没有补偿,会导致频率稳定度损失。实验中采用的是两盘光纤,微观物理结构上的差异和宏观上的微小不对称会引入额外的时延波动残留,如果采用同缆双芯的光缆或单根光纤,稳定度损失会相应降低。

偏振模色散和色散效应会导致往返相位校正后的时延波动残留量加大,进而影响频率传递的稳定度,尤其当温度的变化率较大时,稳定度会进一步劣化。对本地端和远端的光信号进行高速扰偏^[19],结合非零色散位移光纤可以降低其对频率传递稳定度的影响。

4 结 论

以往返相位校正理论为基础,提出了对相位波动在远端进行抵消补偿的微波频率光纤传递新方法,优化了本地端的结构,无需设计精确的相位测量与补偿系统,光纤链路引入的相位波动通过远端的倍频混频电路进行抵消补偿。建立时序模型,仿真分析该时延波动残留对频率传递稳定度的影响,并进行实验验证。在微波调制频率为 1 GHz,光纤链路长度为 25.2 km 的实验条件下,测得频率传递的稳定度损失为 $2 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}$ 和 $6 \times 10^{-17} \text{ d}^{-1}$ 。仿真和实验结果均表明该方案可以有效减小光纤链路频率传递中的稳定度损失,这为光纤链路中高精度微波频率的传输稳定性提升提供了指导依据。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 Ł Sliwczynski, P Krehlik, Ł Buczek, *et al.*. Fiber optic RF frequency transfer on the distance of 480 km with the active stabilization of the propagation delay [C]. *IEEE European Frequency and Time Forum (EFTF)*, 2012. 424–426.

- 3 C Gao, B Wang, L J Wang, *et al.*. Fiber-based multiple-access ultrastable frequency dissemination [J]. *Opt Lett*, 2012, 37(22): 4690–4692.
- 4 B Wang, C Gao, W L Chen, *et al.*. Precise and continuous time and frequency synchronisation at the 5×10^{-19} accuracy level [J]. *Nature/Scientific Reports*, 2012, 2: 556.
- 5 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.
- 6 Bo Ning, Dong Hou, Tuolun Zheng, *et al.*. Hybrid analog-digital fiber-based radio-frequency signal distribution [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2013, 25(16): 1551–1554.
- 7 John MacDonald, George Conway. Compensated fiber optic frequency distribution equipment [C]. 42th PTTI Meeting, 2010. 437–450.
- 8 Sascha Schediwy, Andre Luiten, Kenneth Baldwin. Microwave frequency transfer with optical stabilisation [C]. *IEEE European Frequency and Time Forum (EFTF)*, 2012. 211–213.
- 9 T M Fortier, M S Kirchner, F Quinlan, *et al.*. Generation of ultrastable microwaves via optical frequency division [J]. *Nature Photon*, 2011, 5(7): 425–429.
- 10 Albin Czubla, Łukasz Śliwczynski, Przemysław Krehlik, *et al.*. Stabilization of the propagation delay in fiber optics in a frequency distribution link using electronic delay lines: first measurement results [C]. 43th PTTI Meeting, 2011. 389–396.
- 11 Magnus T L Hsu, Yabai He, Daniel A Shaddock, *et al.*. All-digital radio-frequency signal distribution via optical fibers [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, 24(12): 1015–1017.
- 12 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]. *Eur Phys J D*, 2008, 48(1): 35–41.
- 13 L 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.
- 14 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.
- 15 Lori E Primas, Ronald T Logan, Jr, George F Lutes. Applications of ultra-stable fiber optic distribution systems [C]. 43th Annual Symposium on Frequency Control, 1989. 202–211.
- 16 Gorachand Ghosh, Michiyuki Endo, Takashi Iwasaki. Temperature-dependent Sellmeier coefficients and chromatic dispersions for some optical fiber glasses [J]. *J Lightwave Technol*, 1994, 12(8): 1338–1342.
- 17 Chang Le, Dong Yi, Sun Dongning, *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.
- 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.
- 18 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. 光纤时频传递系统的中继技术分析 [J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0905002.
- 19 O Lopez, A Klein, M Lours, *et al.*. High-resolution microwave frequency dissemination on an 86-km urban optical link [J]. *Appl Phys B*, 2010, 98(1): 723–727.