

频率串扰对光纤频标传递性能的影响

廖睿勇, 卢麟, 朱勇, 吴传信, 张宝富, 于龙强

解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007

摘要 在高精度光纤频标传递过程中,需要对光纤链路引入的相位波动进行测量和补偿,其中引入的频率串扰是影响频标传递性能因素之一。为评估频率串扰对光纤频标传递性能影响,建立了频率串扰对频率传递稳定度的影响模型。在光纤链路温度变化条件下,通过仿真分析和实验研究了频率串扰与稳定度损失之间的关系。结果表明,频标的稳定度损失与串扰因子和频率有关。串扰因子越大,信号的阿伦方差曲线整体上移幅度越大,且串扰因子和稳定度损失峰值近似呈线性关系;频标频率变化时,频标传递的长期稳定度并非只受由温度缓慢变化引起的时延缓慢漂移的影响,也与频率点和时延波动量有关。频率升高时,频率稳定度损失的峰值点向短稳移动。

关键词 光纤光学; 频率串扰; 频率稳定度; 频率传递; 相位波动

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1206002

Impact of Frequency Crosstalk on Fiber Frequency Transfer Performance

Liao Ruiyong, Lu Lin, Zhu Yong, Wu Chuanxin, Zhang Baofu, Yu Longqiang

Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China

Abstract It is necessary to measure and compensate the phase fluctuation introduced by fiber optic links in high-precision fiber frequency transfer. Frequency crosstalk is one of the influence factors, which is easy to be introduced and has a certain impact on the frequency transfer performance. In order to evaluate the impact of frequency crosstalk on fiber frequency transfer performance, the influence model of frequency crosstalk on frequency transfer stability is established. The stability loss caused by frequency crosstalk due to temperature change of fiber link is analyzed by simulation and experiment. The results show that the stability loss of the frequency transfer is related to signal crosstalk factor and the frequency of frequency standard. The larger signal crosstalk factor, the larger the overall up-shift amplitude of Allen deviation curve, and the crosstalk factor is approximately linear with the stability loss peak value. When the frequency of frequency standard changes, the long-term stability of the frequency is not only affected by the slow delay drift caused by the temperature variations, but also related to frequency points and delay fluctuation. If the frequency rises, the peak of the frequency stability loss will move to the short term.

Key words fiber optics; frequency crosstalk; frequency stability; frequency transfer; phase fluctuation

OCIS codes 060.3510; 120.7000; 120.3940

1 引 言

随着高精度原子钟的发展和光纤网络的普及,利用光纤传递频率标准(简称频标)信号已展现出巨大的技术和成本优势。光纤频标传递技术的应用也逐渐从基础物理和精密测量等科学研究领域^[1-3]发展到国防、通信、航天、导航、空间探测等实际应用领域^[4-6]。在高精度频标传递过程中,需要对光纤链路因温度、压力变化等引入的相位波动进行测量和抵消补偿。对于微波频标传递系统而言,无论采用真延迟光学相位补偿方案还是采用压控调整、无源混频等电补偿方案,都需要在中心站或终端站对微波信号进行倍频、混频、移频、分频等处理。在上述频率综合过程中,由于隔离度不足、谐波分量、电路或空间耦合串扰等原因,用户恢复的

收稿日期: 2017-05-01; **收到修改稿日期:** 2017-07-07

基金项目: 国家自然科学基金(61174199,61673393,61371121,61475193)

作者简介: 廖睿勇(1994—),男,硕士研究生,主要从事光纤时频传递方面的研究。E-mail: liaoruiyong1994@163.com

导师简介: 卢麟(1975—),男,副教授,硕士生导师,主要从事光信息技术、光纤时频传递技术等方面的研究。

E-mail: Nj_lulin@163.com(通信联系人)

频标信号可能会叠加包含链路相位波动的频率串扰信号,影响光纤频标传递性能。

本文阐述了光纤频标传递系统中频率串扰对频率稳定度的影响机理,建立了频率串扰对频标传递性能的影响模型。以光纤链路温度缓慢变化作为相位扰动的主要来源,仿真和实验研究了频率串扰和频率点对稳定度损失和峰值时间尺度的影响。

2 频率串扰对频率传递稳定度的影响模型

频率串扰是影响微波频标光纤传递中性能劣化的因素之一。图 1 为典型的无源补偿方案^[7-8],中心站频标信号为 $\cos(\omega_0 t)$,光纤链路引入的相位扰动为 φ_r ,终端站将经历 1 次光纤相位波动的信号进行 3 倍频后,与经历 3 次相位波动的信号进行混频,理想情况下,混频器中频端恢复的频标信号可表示为 $\cos(2\omega_0 t)$,没有携带任何额外的相位扰动。但由于终端混频时可能引入二次谐波串扰的影响, $\cos(2\omega_0 t)$ 会叠加频率串扰 $\cos(2\omega_0 t + 6\varphi_r)$ 。

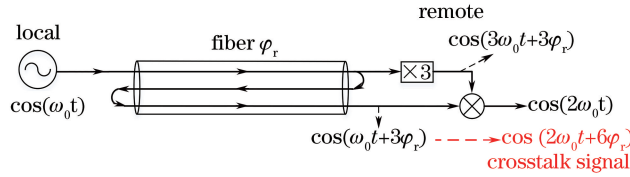


图 1 相位波动远端补偿光纤频标传递原理

Fig. 1 Fiber frequency transfer through phase fluctuation compensation at remote

需要特别指出的是,虽然混频过程中的频率串扰问题可采用移频混频方案加以抑制^[9-10],但由于理论上任何采用无源补偿方案的频标传递系统^[11-13]都会存在频率串扰,即使采用其他测量补偿方案^[14-16],链路相位波动也可能在端站的电域频率综合处理的各环节中被引入系统,从而影响最终恢复的频标信号性能,因此量化分析研究频率串扰对频标传递性能的影响十分必要。

假设光纤链路的时延波动为 $x_r(t)$,则传递频标信号的链路相位波动为

$$\varphi_r(t) = \omega_0 x_r(t), \quad (1)$$

式中 $\omega_0 = 2\pi f_0$, f_0 为频标标称频率;若最终恢复的频标信号 $\cos(\omega_0 t)$ 叠加了包含链路相位波动的频率串扰信号,可表示为

$$\cos(\omega_0 t) + a \cos[\omega_0 t + b\varphi_r(t)], \quad (2)$$

式中 a 为叠加的串扰信号与频标信号的幅度比值,称为串扰因子; b 为相位波动 $\varphi_r(t)$ 的相位串扰系数。

(2)式可以写为

$$\cos(\omega_0 t) + a \cos[\omega_0 t + b\varphi_r(t)] = A(t) \cos[\omega_0 t + \varphi(t)], \quad (3)$$

式中

$$A(t) = \sqrt{1 + a^2 + 2a \cos[b\varphi_r(t)]}, \quad (4)$$

$$\varphi(t) = \arccos\left\{\frac{1 + a \cos[b\varphi_r(t)]}{\sqrt{1 + a^2 + 2a \cos[b\varphi_r(t)]}}\right\}. \quad (5)$$

为计算叠加了串扰的信号的稳定度,将相位波动 $\varphi(t)$ 转化为时延波动

$$x(t) = \arccos\left\{\frac{1 + a \cos[b\varphi_r(t)]}{\sqrt{1 + a^2 + 2a \cos[b\varphi_r(t)]}}\right\} / (2\pi f_0), \quad (6)$$

则由阿伦方差^[17]

$$\sigma(\tau) = \frac{1}{2(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} (\bar{y}_{i+1} - \bar{y}_i)^2, \bar{y}(t) = \frac{x(t+\tau) - x(t)}{\tau} \quad (7)$$

可计算出叠加了串扰频率信号的稳定度,式中 τ 为采样点间隔, \bar{y}_i 为在第 i 个 τ 时间段内相对频率变化的平均值, M 为相应的数据点总数。

3 频率串扰对频率传递稳定度的影响分析

若 $x_r(t)$ 为频标传递过程中, 光纤链路上气温的周期变化导致的时延波动, 可将 $x_r(t)$ 建模为^[18]

$$x_r(t) = \frac{nL\alpha\Delta T}{2c} \sin\left(\frac{2\pi t}{P_T}\right), \quad (8)$$

式中将 1 日气温变化建模为正弦变化形式, 日气温变化峰值为 ΔT , 周期为 P_T ; c 为光速; n 为纤芯折射率; L 为光纤的长度; α 为石英光纤的温度膨胀系数(约为 $7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)。

(8)式中, 取 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, $n = 1.467$, $L = 50 \text{ km}$, $\Delta T = 9 \text{ }^\circ\text{C}$, $\alpha = 7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $P_T = 43200 \text{ s}$ 。代入(1)式和(7)式, 分别仿真分析串扰因子 a 、相位串扰系数 b 和频标频率 f_0 对频率稳定度的影响。

频标频率 $f_0 = 1 \text{ GHz}$ 、相位串扰系数 $b = 1$ 时, 串扰因子 a 取 0.1、0.01、0.001、0.00004, 阿伦方差仿真曲线如图 2 所示。

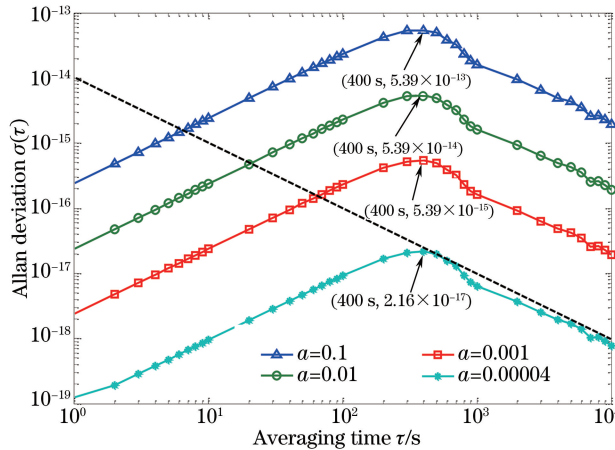


图 2 $f_0 = 1 \text{ GHz}$, $b = 1$ 时阿伦方差仿真曲线

Fig. 2 Allan deviation simulation curve when $f_0 = 1 \text{ GHz}$, $b = 1$

图 2 中虚线为最好的微波钟极限^[19](秒稳为 10^{-14} , 万秒稳为 10^{-18} 的 1 倍频程线), 频率标准传递的稳定度损失低于虚线时即可认为是无损传递。由图 2 可知, 频标频率 $f_0 = 1 \text{ GHz}$ 时稳定度损失峰值 $\sigma_{\max}(\tau)$ 出现在 400 s; 串扰因子 $a = 0.1$ 时, $\sigma_{\max}(\tau)$ 为 5.39×10^{-13} ; $a = 0.01$ 时, $\sigma_{\max}(\tau)$ 为 5.39×10^{-14} ; $a = 0.001$ 时, $\sigma_{\max}(\tau)$ 为 5.39×10^{-15} ; $a = 0.00004$ 时, $\sigma_{\max}(\tau)$ 为 2.16×10^{-17} 。可以看出, 无论 a 取何值, $\sigma_{\max}(\tau)/a = 5.39 \times 10^{-13}$ 约为一常数, 串扰因子 a 与稳定度损失峰值 $\sigma_{\max}(\tau)$ 近似线性关系。当 $a = 0.00004$, 相当于串扰信号功率要比频标信号功率小 88 dB 时, 仿真阿伦方差曲线刚好在虚线下方, 此时可以实现频标的无损传输。

频标频率 $f_0 = 1 \text{ GHz}$, 以无损传递 $a = 0.00004$ 为基准, 综合各类方案^[20-22] b 取 0.5、1、2、3, 阿伦方差仿真曲线如图 3 所示。

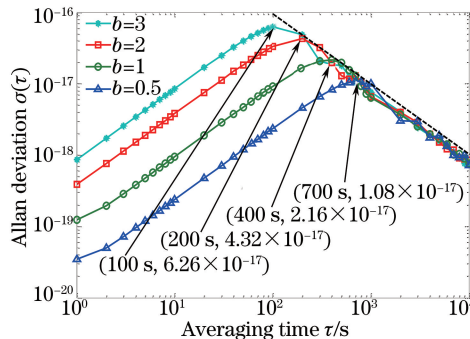


图 3 $f_0 = 1 \text{ GHz}$, $a = 0.00004$ 时阿伦方差仿真曲线

Fig. 3 Allan deviation simulation curve when $f_0 = 1 \text{ GHz}$, $a = 0.00004$

图 3 中 $b = 0.5$ 时, $\sigma_{\max}(\tau)$ 为 1.08×10^{-17} @ 700 s; $b = 1$ 时, $\sigma_{\max}(\tau)$ 为 2.16×10^{-17} @ 400 s; $b = 2$ 时, $\sigma_{\max}(\tau)$ 为 4.32×10^{-17} @ 200 s; $b = 3$ 时, $\sigma_{\max}(\tau)$ 为 6.26×10^{-17} @ 100 s; $\sigma_{\max}(\tau)/b$ 也近似一常数。随着 b 的增大, 稳定度损失峰值也增大, 并向短稳移动; 阿伦方差曲线的短稳逐渐抬高, 而长稳基本保持不变。由图 3

可知,频率 f_0 与 a 确定时,无论 b 取何值,阿伦方差曲线在秒稳为 10^{-14} ,万秒稳为 10^{-18} 的 1 倍频程线以下所需的隔离度不变,因此,考虑 a 、 b 两个因素及各类方案实际情况,可以得出实现无损频率传递要求的隔离度主要由 a 的取值决定。

由图 2 和图 3 也可以看出,日气温万秒量级的缓慢变化引起的稳定度损失峰值却出现在 400 s,因此频率串扰的影响特性不仅与温度波动的尺度和量级有关,还与传输微波信号的频率点有关。图 4 是 $b=1$,串扰因子 $a=0.1$,相当于串扰信号功率要比频标信号功率小 20 dB 不变时, f_0 取 10 MHz、100 MHz、1 GHz、10 GHz 时的仿真阿伦方差曲线。

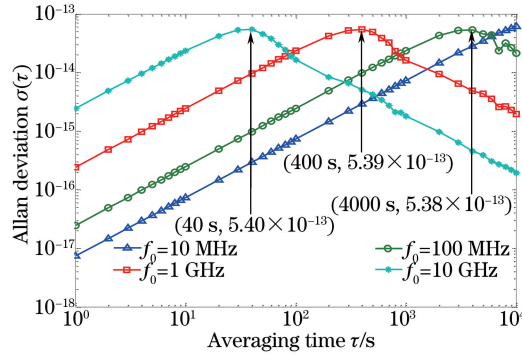


图 4 $a=0.1, b=1$ 时阿伦方差仿真曲线

Fig. 4 Allan deviation simulation curve when $a=0.1, b=1$

由图 4 可知,频标频率变化时,频标传递的长期稳定度并非只受由温度缓慢变化引起的时延缓慢漂移的影响,也与频率点有关,随着 f_0 的增大,频率稳定度损失峰值点向短稳移动。图 4 中, $f_0=100$ MHz 时稳定度损失峰值 $\sigma_{\max}(\tau)$ 在 4000 s,1 GHz 的峰值 $\sigma_{\max}(\tau)$ 在 400 s,10 GHz 的峰值 $\sigma_{\max}(\tau)$ 在 40 s。由此可以看出: f_0 每提高为原来的 10 倍,稳定度损失峰值所在的时间尺度为原来的 1/10;而 $f_0=10$ MHz 的稳定度损失最大值在万秒,与气温的周期变化尺度相当,并不满足以上规律。

产生这一现象的原因是:由(1)式可知,频率越高时,相同的链路时间波动 $x_r(t)$ 所导致的链路相位波动 $\varphi_r(t)$ 越大。当 $\varphi_r(t)$ 变化小于 2π 时,例如 $f_0=10$ MHz 时,其他条件不变,由(8)式计算可得链路时间波动 $x_r(t)$ 峰值为 15.40 ns,由(1)式可知链路相位波动 $\varphi_r(t)$ 峰峰值为 0.308π ,小于 2π ,因此, $\cos[\varphi_r(t)]$ 时间变化尺度与温度变化引起的链路时间波动 $x_r(t)$ 相当,即叠加了串扰信号的恢复信号时延波动 $x(t)$ 的稳定度损失变化尺度与温度变化的时间周期相当。在相同链路温度变化条件下因频率升高而导致 $\varphi_r(t)$ 变化超过 2π 时,例如 $f_0=1$ GHz 时,链路相位波动 $\varphi_r(t)$ 峰峰值为 30.82π ,那么 $\cos[\varphi_r(t)]$ 变化了 15.41 个周期,也就是说温度从最小值变化到最大值 21600 s 时,叠加了串扰信号的恢复信号 $x(t)$ 也变化了 15.41 个周期,则 $x(t)$ 变化的平均周期为 1401.69 s,那么, $x(t)$ 在百秒量级的半个周期内波动最大,即 $f_0=1$ GHz 时频率稳定度损失峰值在的百秒量级,与仿真结果吻合。所以虽然温度变化是万秒稳尺度的,但由于串扰的存在也会影响频标的短稳,且传输频标频率越高,受影响的时间尺度变化越快,阿伦方差曲线峰值整体左移。在实际系统中,可以根据对应的时间尺度上阿伦方差是否突起来判断是否引入串扰,并计算出引入串扰的大小;并在串扰一定的情况下,为了使频标传递短稳或长稳更好,可以对频标频率进行调整,使得系统在短稳或长稳上性能更好。

由于不同频率点对应的稳定度损失峰值的时间尺度不同,要实现频标的无损传递,阿伦方差曲线需要在如图 2 所示的以 10^{-14} 秒稳为起点,1 倍频程下降的无损传递标准虚线的下方。不同频率点允许的串扰因子最大值 a_{\max} 不同, $10\lg a_{\max}^2$ 为 a_{\max} 对应的串扰信号与频标信号功率比值,其仿真结果如表 1 所示。 $f_0=1$ GHz 时,只有串扰信号功率比频标信号功率小 88.0 dB 时,才能实现频标的无损传递,此时频率稳定度损失峰值为 2.17×10^{-17} @400 s。

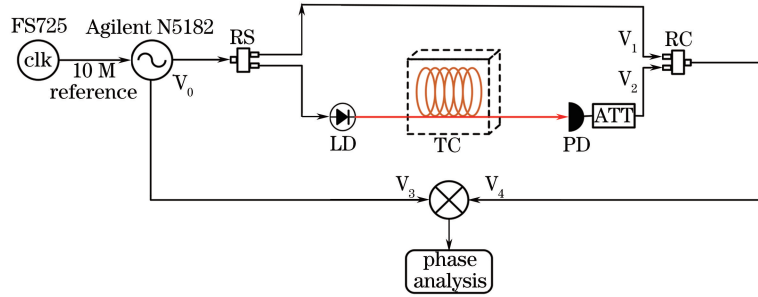
4 实验系统及结果分析

为检验频率串扰对光纤频标传递性能的影响,搭建如图 5 所示的实验平台。平台以 FS725 的 10 MHz

表 1 频标的无损传递时不同频率点对应的 a_{\max}

Table 1 a_{\max} corresponding to different frequency points transferred nondestructively

f_0	$a_{\max} (10\lg a_{\max}^2)$	$\sigma_{\max} (\tau)$
10 MHz	$1.5 \times 10^{-6} (-116.5 \text{ dB})$	$1.00 \times 10^{-18} @ 10000 \text{ s}$
100 MHz	$3.8 \times 10^{-6} (-108.4 \text{ dB})$	$2.01 \times 10^{-18} @ 4000 \text{ s}$
1 GHz	$4.0 \times 10^{-5} (-88.0 \text{ dB})$	$2.17 \times 10^{-17} @ 400 \text{ s}$
10 GHz	$4.2 \times 10^{-4} (-67.5 \text{ dB})$	$2.27 \times 10^{-16} @ 40 \text{ s}$



LD: laser diode; PD: photo detector; RS: radio frequency splitter; RC: radio frequency combiner;
TC: temperature control; ATT: attenuator

图 5 频率串扰引起的稳定度损失测试系统

Fig. 5 Test system of stability loss caused by frequency crosstalk

标准频率作为参考信号,通过锁定 Agilent N5182 信号发生器产生稳定频率信号 V_0 。该信号一部分通过短同轴电缆直接传输得到稳定频率信号 V_1 ;另一部分通过调制激光器(LD)进入随温度变化的光纤,使相位上叠加扰动信号,再通过光电探测器(PD)光电转换得到串扰信号 V_2 ;通过改变射频衰减器(ATT)改变 V_2 与 V_1 的功率比值,进而改变串扰因子 a ;最后 V_1 和 V_2 合路得到 V_3 ,与源信号 V_4 进行比对。

通过上述设计,信号 V_1 和 V_4 由信号源直接输出,为稳定频标信号 $\cos(\omega_0 t)$;信号 V_2 引入了光纤链路上的相位扰动,为串扰信号 $\cos[\omega_0 t + \varphi_r(t)]$;信号 V_3 由 V_1 和 V_2 合路得到,为叠加了频率串扰的恢复信号 $\cos(\omega_0 t) + a \cos[\omega_0 t + \varphi_r(t)]$,串扰因子 a 可由稳定频标信号 V_1 和串扰信号 V_2 的功率比值换算得到;最后信号 V_3 和 V_4 进行混频,对其混频输出值进行相位波动测量计算,即可得到叠加了频率串扰的恢复信号的稳定度损失,对仿真结果进行验证。

在测量信号稳定性之前,首先对测量过程的背景噪声进行测量。将图 5 中的光纤换为 1 根短光纤,去除串扰信号 V_2 中光纤链路温度变化带来的相位波动后,进行相位稳定性测量,得到系统的背景噪声。然后对仿真结果进行验证,用两盘 25 km 的光纤放入可编程恒温箱内,每次实验使气温变化 1 个类似正弦的周期:峰值为 9°C ,周期为 43200 s, $f_0 = 1 \text{ GHz}$ 时, V_1 和 V_2 功率比值分别为 -19.17 dB 、 -43.02 dB ,换算得到的串扰因子 a 分别为 0.11、0.007; $f_0 = 100 \text{ MHz}$ 时, V_1 和 V_2 功率比值分别为 -20.92 dB 、 -41.14 dB ,对应的串扰因子 a 分别为 0.09、0.009,实验和仿真的稳定度结果对比如图 6 所示。

图 6(a)为频标频率 $f_0 = 100 \text{ MHz}$,串扰因子 $a = 0.09$ 、0.01 时,实验测得和仿真的稳定度损失阿伦方差曲线;图 6(b)为频标频率 $f_0 = 1 \text{ GHz}$,串扰因子 $a = 0.11$ 、0.007 时,实验和仿真的阿伦方差曲线;两图中的系统背景噪声为纯实线。

由图 6 可知,串扰因子 a 减小时,无论频标频率 f_0 为 100 MHz 还是 1 GHz,稳定度损失曲线整体下降,叠加了频率串扰的恢复信号稳定性较好;同时频标的稳定度损失与串扰因子有关,串扰因子越大,信号的阿伦方差曲线整体上移幅度越大。实验结果的定性规律与定量结果均与仿真结果吻合。图 6(a)中,频标频率 f_0 为 100 MHz 时,实验的阿伦方差曲线峰值在 4000 s 左右;图 6(b)中,频标频率 f_0 为 1 GHz 时,实验的阿伦方差曲线峰值在 400 s 左右,都与仿真中频率点对应峰值出现的时间尺度结果吻合。这说明由于串扰的存在,频标传递的长期稳定度并非只受由温度缓慢变化引起的时延缓慢漂移的影响,也与频率点有关,频率升高时,频率稳定度损失的峰值点向短稳移动。但由于仿真中只考虑了环境温度变化带来的扰动,未考虑影响短期稳定度的噪声,所以实验结果与仿真在长稳上比较吻合,在短稳上相差较大。由串扰因子 a 越小,对

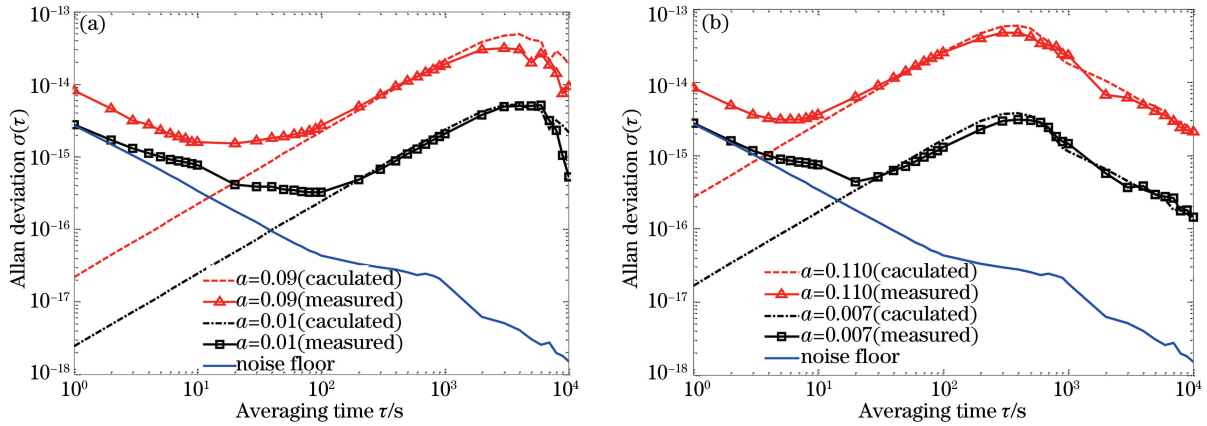


图 6 阿伦方差实验与仿真曲线。(a) $f_0 = 100$ MHz; (b) $f_0 = 1$ GHz

Fig. 6 Allan deviation curves by experiment and simulation. (a) $f_0 = 100$ MHz; (b) $f_0 = 1$ GHz

恢复信号的短期稳定度影响也越小可以看出,在 a 取 0.01 及以下时实验测得的短稳已基本达到系统的背景噪声,此时若再减小 a ,频标信号的短稳将基本不变。

5 结 论

阐述了频率串扰中对光纤频标传递的影响,以光纤链路温度变化作为相位扰动的主要来源,仿真分析了传输频率和串扰因子对频率稳定度的影响。搭建了实验系统,利用可编程恒温箱控制光纤链路温度变化,并对仿真结果进行了验证。理论和实验结果表明:串扰因子的大小与频率传递的整体性能之间呈线性反比量化关系。而频标频率变化时,频标传递的长期稳定度损失并非只受以日气温尺度变化引起的时延缓慢漂移的影响,也与频率点和时延波动量有关。频率越高,串扰导致的稳定度损失的峰值点向短稳移动。以日气温波动 $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 50 km 链路为例:频标频率为 100 MHz 时,串扰信号影响频标的千秒稳定度,要实现无损传递串扰隔离应大于 108 dB ;频标频率为 1 GHz 时,串扰信号影响频标的百秒稳定度,要实现无损传递串扰隔离应大于 88 dB 。

参 考 文 献

- [1] Chou C W, Hume D B, Rosenband T, *et al.* Optical clocks and relativity[J]. *Science*, 2010, 329(5999): 1630-1633.
- [2] Narbonneau F, Lours M, Bize S, *et al.* High resolution frequency standard dissemination via optical fiber metropolitan network[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77(6): 064701.
- [3] Diddams S A, Hollberg L, Mbele V. Molecular fingerprinting with the resolved modes of a femtosecond laser frequency comb[J]. *Nature*, 2007, 445(7128): 627-630.
- [4] Krehlik P, Śliwczyński Ł, Buczek Ł, *et al.* ELSTAB-fiber optic time and frequency distribution technology: A general characterization and fundamental limits[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control*, 2015, 63(7): 993-1004.
- [5] Lopez O, Kéfélian F, Jiang H, *et al.* Frequency and time transfer for metrology and beyond using telecommunication network fibres[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2015, 16(5): 531-539.
- [6] Chen Wei, Cheng Nan, Liu Qin, *et al.* High precision time and frequency transfer on 275 km Beijing—Shanghai fiber backbone[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(7): 0706001.
陈炜, 程楠, 刘琴, 等. 275 km 京沪光纤干线高精度时频传递研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(7): 0706001.
- [7] 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.
- [8] Li W, Wang W, Sun W, *et al.* Stable radio-frequency phase distribution over optical fiber by phase-drift auto-cancellation[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(15): 4294-4296.
- [9] Wu Z, Dai Y, Yin F, *et al.* Stable radio frequency phase delivery by rapid and endless post error cancellation[J].

- Optics Letters, 2013, 38(7): 1098-1100.
- [10] Narbonne F, Lours M, Bize S, *et al.* High resolution frequency standard dissemination via optical fiber metropolitan network[J]. Review of Scientific Instruments, 2006, 77(6): 064701.
- [11] Lopez O, Amy-Klein A, Daussy C, *et al.* 86-km optical link with a resolution of 2×10^{-18} for RF frequency transfer [J]. The European Physical Journal D, 2008, 48(1): 35-41.
- [12] Pan S, Wei J, Zhang F. Passive phase correction for stable radio frequency transfer via optical fiber [J]. Photonic Network Communications, 2016, 31(2): 327-335.
- [13] Jiang Z, Dai Y, Zhang A, *et al.* Precise time delay sensing and stable frequency dissemination on arbitrary intermediate point along fiber-optic loop link with RF phase locking assistance[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(2): 14997221.
- [14] Li D, Hou D, Hu E, *et al.* Phase conjugation frequency dissemination based on harmonics of optical comb at 10^{-17} instability level[J]. Optics Letters, 2014, 39(17): 5058-5061.
- [15] Wang B, Zhu X, Gao C, *et al.* Square kilometre array telescope—precision reference frequency synchronisation via 1f-2f dissemination[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 13851.
- [16] Shen J, Wu G, Hu L, *et al.* Active phase drift cancellation for optic-fiber frequency transfer using a photonic radio-frequency phase shifter[J]. Optics Letters, 2014, 39(8): 2346-2349.
- [17] Riley W. Handbook of frequency stability analysis[J]. NIST SP-1065, 2007, 1065: 1-123.
- [18] Yu Weidong, Tang Xinhai. Simulation and modification of daily variation of air temperature[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2009, 30(1): 35-40.
余卫东, 汤新海. 气温日变化过程的模拟与订正[J]. 中国农业气象, 2009, 30(1): 35-40.
- [19] Santarelli G, Laurent P, Lemonde P, *et al.* Quantum projection noise in an atomic fountain: A high stability cesium frequency standard[J]. Physical Review Letters, 1999, 82(23): 4619-5622.
- [20] Leng J, Luo G, Li D, *et al.* RF transfer by optical comb over 50-km fiber link with, 4.7×10^{-18} instability[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(1): 15746078 .
- [21] Li W, Wang W T, Sun W H, *et al.* Stable radio-frequency phase distribution over optical fiber by phase-drift auto-cancellation[J]. Optics Letters, 2014, 39(15): 4294-4296.
- [22] Bai Y, Wang B, Gao C, *et al.* Fiber-based radio frequency dissemination for branching networks with passive phase-noise cancelation[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(6): 36-39.