

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.03.15

光纤频率传递的链路不对称性分析

李静¹, 高昊¹, 刘晨霞², 罗斌^{1*}, 喻松¹

(1.北京邮电大学 信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876;

2.华北电力大学 电子与通信工程学院, 河北 保定 071000)

摘要: 基于光纤的频率传递在时频同步体系的构建与应用中占据着重要地位。为了在射频稳相传输系统中定量研究由于温度不对称和波长不对称所引入的延迟波动和色散残余等因素对系统稳定性的影响, 使用光学仿真软件搭建了简易频率传递系统与 3 000 km 光纤链路进行 10 GHz 射频信号传递的仿真分析。通过分析发现链路中引入的温度不对称对系统频率稳定性影响较小, 而波长不对称所导致的影响较大, 随着正反向波长的差异增大, 系统频率稳定性恶化量级在 $10^{-13}/s$ 以上。此研究分析对实际环境下的长距离光纤频率传递系统的建设及优化具有实际指导作用。

关键词: 时频传递; 不对称分析; 光纤链路; 射频信号传递

中图分类号: TB939

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795(2023)03-0149-07

Analysis of link asymmetry for stable radio frequency transmission over optical fiber

LI Jing¹, GAO Hao¹, LIU Chenxia², LUO Bin^{1*}, YU Song¹

(1.State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China; 2.Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071000, China)

Abstract: Frequency transmission based on optical fibers plays an important role in the construction and application of time-frequency synchronization systems. In order to quantify the effect of delay fluctuations and dispersive residuals introduced by temperature and wavelength asymmetries on the stability of the stable radio frequency transmission system, a simple frequency transmission system and a 3 000 km fiber link are constructed using optical simulation software for simulation and analysis of 10 GHz RF signal transmission. Through analysis, it is found that the temperature asymmetry introduced in the link has a small effect on system frequency stability, while the wavelength asymmetry has a larger effect. The stability of the system deteriorates by more than $10^{-13}/s$ as the difference between the positive and negative wavelength increases. This study has a practical guiding effect on the construction and optimization of the long distance optical fiber frequency transmission system in the actual environment.

Key words: time-frequency transmission; asymmetry analysis; fiber link; RF signal transmission

收稿日期: 2023-02-22; 修回日期: 2023-03-30

基金项目: 国家自然科学基金 (61531003, 61690195, 61701040, 61427813); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2022MS076); 北京邮电大学中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2022RC08-500422353, 2022RC10-500422355)

引用格式: 李静, 高昊, 刘晨霞, 等. 光纤频率传递的链路不对称性分析[J]. 计测技术, 2023, 43(3): 149-155.

Citation: LI J, GAO H, LIU C X, et al. Analysis of link asymmetry for stable radio frequency transmission over optical fiber[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(3):149-155.



0 引言

随着信息社会的发展,精确的同步频率信号在导航、深空网络、射电天文、原子钟比对等诸多应用领域发挥着重要作用^[1-7]。与传统的卫星链路相比,光纤作为传输介质具有低损耗、高安全性的优势,而且现有的地下光纤已经相对成熟,这为基于光纤的频率传递研究带来了便利^[8-9]。

在稳定频率信号传递过程中,所传递的信号在光纤链路中受到温度变化和机械扰动等干扰,累积了额外的相位噪声,导致接收端所收到的信号恶化。国内外的研究小组对如何提高光纤中传输信号的稳定性进行了深入研究^[10-18]。通用的补偿方法为利用相位共轭,借助链路的对称性对链路中引入的噪声加以抵消,而实际情况是正反向链路设置及传输时延差等导致出现不对称的特性。研究光纤传输系统中的不对称因素及其影响程度对设计和优化稳定的频率传输系统具有重要意义。李德龙团队于2014年研究了激光器动态波长变化对链路时延波动的影响,发现其波长变化与链路时延波动呈强相关性^[19]。但在理论分析中采用的正弦模型来模拟温度变化,与实际环境存在一定偏差^[20]。波兰AGH科技大学对未补偿的信号进行了一些简化的定性分析,对链路中引入的噪声进行了归纳与影响量级分析^[21]。面对复杂环境下的实际光纤链路,需进行更精密化分析,以寻找频率稳定性恶化的主要因素。

通过对基于光纤的频率传递系统中链路不对称性因素进行归纳,利用仿真软件对其频率传递稳定性影响进行分析,利用实际温度数据进行细化模拟,分析实际情况下的链路波动,并在3 000 km的仿真链路中进行测试。研究发现温度变化对其影响极小,但激光器传递波长不对称性的影响较大,随着正反向链路中传递波长差异化增加,对频率传递稳定性的影响量级达到了 10^{-13} /s。

1 频率信号模型

射频信号在传输过程中会引入诸多噪声,相位噪声在传输路径上不断累积^[22-23],光纤上的相位噪声由传输延迟时间产生,传输延迟时间 τ 表示为

$$\tau = \frac{n_g \cdot L}{c} \quad (1)$$

式中: n_g 为群折射率,对G. 652光纤来说,群折射率典型值为1.468; L 为光纤长度; c 为真空中的光速。光纤的长度和折射率会随着温度的变化而变化,从而导致传输时延波动。那么延迟差 $\Delta\tau$ 对温度 T 的导数为

$$\frac{\Delta\tau}{\Delta T} = \frac{L}{c} \beta + L\alpha \frac{n_g}{c} \quad (2)$$

式中: α 为光纤的热膨胀系数, $\alpha = \partial L / \partial T$; β 为光纤折射率热系数, $\beta = \partial n_g / \partial T$ 。

除此以外,光纤链路中的色散也会引起时延波动,表示为

$$\Delta\tau = DL\Delta\lambda \quad (3)$$

式中: D 为群速度色散系数, $D = \partial n_g / (\partial \lambda)$,其在G. 652光纤中的典型值为17 ps / (nm·km); $\Delta\lambda$ 为传递所用激光器的光波长偏移。

时间抖动到相位变化的转换关系式为

$$\Delta\phi = 2\pi f \Delta\tau \quad (4)$$

频率信号的相对频率偏差 $y(t)$ 可表示为

$$y(t) = \frac{d\Delta\phi}{2\pi f_0 dt} \quad (5)$$

式中: f_0 为所测试频率信号在整个测量周期内的平均频率值。其阿伦方差(ADEV)表示为

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\left\langle \frac{(\overline{y_{k+1}} - \overline{y_k})^2}{2} \right\rangle} \quad (6)$$

式中: $\langle \rangle$ 为无限时间上的平均; $\overline{y_k}$ 为在第 k 个采样时间 τ 内频率的平均值。

2 温度影响模型

温度模型可先以简单的正弦曲线建模,通常埋地光缆的日变化温度小于1℃,由温度变化引起光纤长度波动对频率稳定性影响 $\sigma_{y,1}(\tau)$ 表示为

$$\sigma_{y,1}(\tau) = \frac{nLA}{c} \frac{\partial \Delta L}{\partial T} \frac{2}{\tau} \left\{ \sin\left(\frac{\pi\tau}{T_1}\right) \right\}^2 \quad (7)$$

式中: T 为温度; A 为温度在一天中最大波动值; T_1 为温度变化的周期。

同样,温度变化引起的折射率变化对频率稳定性的影响 $\sigma_{y,2}(\tau)$ 表示为

$$\sigma_{y,2}(\tau) = \frac{nLA}{c} \frac{\partial \Delta n}{\partial T} \frac{2}{\tau} \left\{ \sin\left(\frac{\pi\tau}{T_1}\right) \right\}^2 \quad (8)$$

由光波长瞬时波动与残余色散对频率稳定性影响 $y(t)$ 表示为

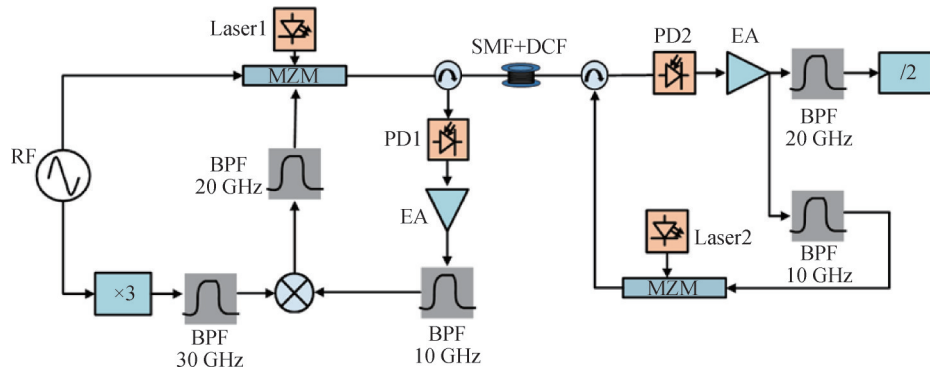
$$y(t) = \frac{DL\partial\Delta\phi(t)}{\partial t} \quad (9)$$

式中: $\partial\Delta\phi(t)/\partial t$ 为光波长瞬时波动值, 通常由激

光器的性能所决定。

3 仿真系统搭建

为了对链路不对称进行进一步的量化分析, 利用光学仿真软件 VPI 搭建了一个较为经典的频率传递系统的仿真模型。图 1 为仿真方案的原理示意图, 表 1 为仿真中器件的参数设置。



注: BPF-带通滤波器; MZM-马赫增德尔调制器; PD-光电探测器; EA-电放大器;
Laser-激光器; SMF-单模光纤; DCF-色散补偿光纤。

图 1 双波长传输系统仿真原理图

Fig.1 Simulation schematic diagram of dual wavelength transmission system

表 1 仿真中参数设置

Tab.1 Parameter settings in simulation

激光器 频率/THz	激光器 线宽/MHz	激光器 输出功率/dBm	光纤衰减 /(dB·km ⁻¹)	光放大噪声 系数/dB	光电探测器 灵敏度/(A·W ⁻¹)
194.1	1.0	10.0	0.2	3.2	1.0

发送端的射频信号在光纤链路中经过 3 次传递, 在相关混频滤波器经信号处理后, 抵消掉链路中引入的大部分噪声, 在远端获得一个稳定的射频信号。初始射频信号表示为

$$V_o \propto \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (10)$$

式中: ω_0 为本振频率, GHz, 在仿真软件中设置为 10 GHz; φ_0 为初始固有相位。

射频信号由马赫增德尔 (MZM) 调制器调制后, 经过光纤链路, 由接收端的光电探测器 (PD2) 检测出, 经中心频率为 10 GHz 的带通滤波器后, 输出信号为

$$V_1 \propto \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi_{p1}) \quad (11)$$

式中: φ_{p1} 为中心频率为 ω_0 的信号从发送端到接收端经过光纤链路所附带的相位噪声。

由收端的强度调制器调制后, 发送回发端, 此时发端的光电探测器 (PD1) 检测到信号表示为

$$V_2 \propto \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi_{p1} + \varphi_{p2}) \quad (12)$$

式中: φ_{p2} 为中心频率为 ω_0 的信号从接收端到发送端经过光纤链路所附带的相位噪声。该信号与初始信号的三倍频信号混频后, 经过中心频率为 20 GHz 的带通滤波器 (BPF) 后, 加载到强度调制器上的信号变为

$$V_3 \propto \cos(2\omega_0 t + 2\varphi_0 - \varphi_{p1} - \varphi_{p2}) \quad (13)$$

信号经过光纤链路, 对所附带的相位波动进行抵消, 由收端光电探测器 (PD2) 探出, 经过中心频率为 20 GHz 的带通滤波器与二频器件后, 在收端恢复稳定射频信号表示为

$$V_4 \propto \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{2\varphi_3 - \varphi_1 - \varphi_2}{2}) \quad (14)$$

式中： $2\varphi_{p3}$ 为中心频率为 $2\omega_0$ 的信号从发送端到接收端经过光纤链路所附带的相位噪声。当满足 $\varphi_{p1} \approx \varphi_{p2} \approx \varphi_{p3}$ 时，可在接收端获得稳定的频率信号，但实际链路中的相位噪声 φ_p 一直在实时波动，难以抵消，本研究所探究的就是频率信号受影响因素及其影响的量级大小。

除频率传递系统以外，本研究还利用仿真软件搭建了3 000 km光纤链路，在其中设置了双向光放大器（Bi-EDFA）及色散补偿光纤（DCF）。将光纤损耗值设置为0.2 dB/km，每间隔100 km设置1台Bi-EDFA，色散补偿程度为可选设置。除此以外，为了更贴合真实环境，还对实际情况下的激光器频漂进行了采集，如图2所示。

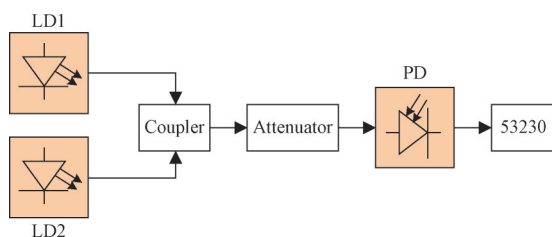


图2 激光器频率波动采集示意图

Fig.2 Schematic diagram of laser frequency fluctuation acquisition

对两台实际使用的单模激光器经光耦合器后，利用光电探测器探测出相关差频信号，利用频率计数器53230进行频率采集，以获取其激光器的实际波长波动值。

4 仿真结果分析

图3为使用高精度数据采集卡采集的实验室温度变化数据，温度值在24~26℃之间变化。

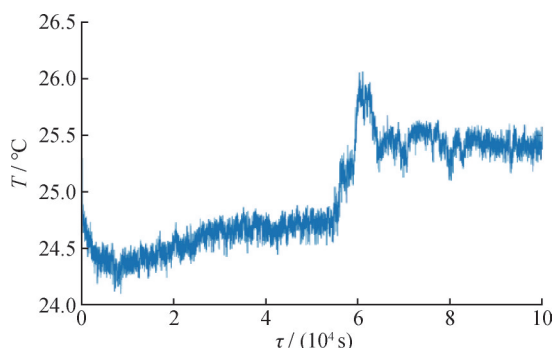


图3 实验室温度数据

Fig.3 Laboratory temperature data

图4为受实际温度波动影响的稳定性结果图，黑线为温度引起光纤长度变化而影响的频率稳定性结果；蓝线为温度引起光纤折射率变化而影响的频率稳定性结果；红线为二者相加的影响。由仿真结果可知，温度引起的光纤长度变化对频率稳定性影响远小于折射率变化对频率稳定性的影响。

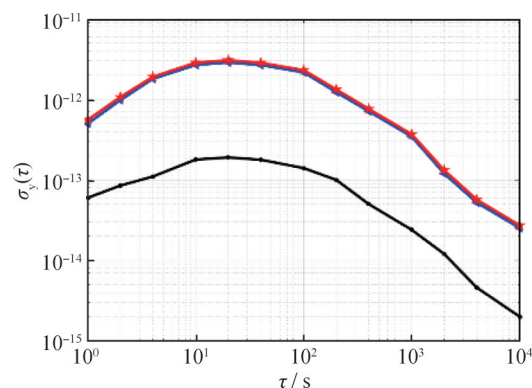


图4 受实际温度波动影响的稳定性结果图

Fig.4 Instability impacted by actual temperature fluctuation

在已搭建好的仿真模型中进行了光纤温度波动的仿真实验，将所采集的真实光纤链路温度变化数据导入仿真模型中。温度对频率传递系统的频率稳定性影响如图5所示。

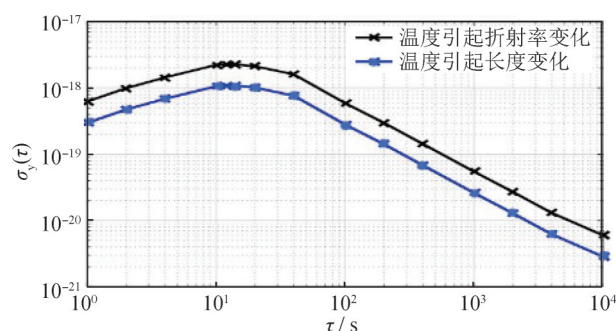


图5 温度对系统稳定性影响

Fig.5 Systematic instability impacted by actual temperature fluctuation

经过补偿后的温度对于光纤传递系统的影响在 9×10^{-18} @1 s量级。因实际的光纤链路一般都深埋地下，温度变化较小，峰峰值一般为0.2℃左右，且是一个比较缓慢的过程，所以温度对光纤中传输信号的影响主要体现在长期稳定度上，短期稳定度影响较小。

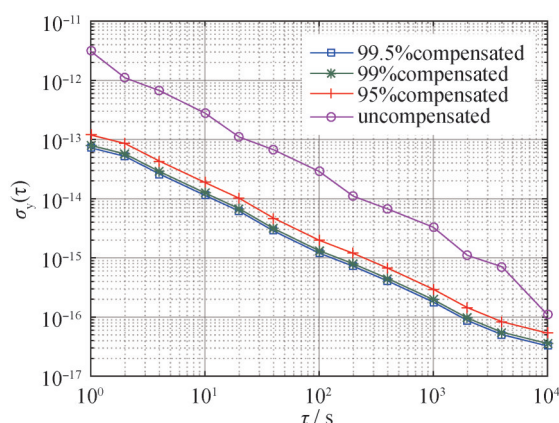


图6 色散补偿率对频率稳定性影响图

Fig.6 Effect of dispersion compensation ratio on frequency stability

本文对于长距离下的色散补偿率对传递系统的频率稳定性的影响进行了仿真分析,结果如图6所示。图6中紫色曲线为不进行色散补偿情况下的3 000 km光纤链路频率稳定性仿真结果,稳定性为 $2.8 \times 10^{-12}/s$ 和 $1.4 \times 10^{-16}/10^4 s$;当色散补偿程度达到95%后,其稳定性为 $1.4 \times 10^{-13}/s$ 和 $7.6 \times 10^{-17}/10^4 s$;当色散补偿程度达到99%后,其稳定性为 $8.9 \times 10^{-14}/s$ 和 $5.6 \times 10^{-17}/10^4 s$;而色散达到理想补偿状态与补偿程度99%基本一致。对未进行色散补偿和色散补偿的秒稳和万秒稳对比分析,可知色散对系统短期稳定性影响比较大。由仿真结果对比可知,色散补偿比温度对系统稳定性影响大。所以,在基于光纤的频率传递系统中,对链路的色散补偿极为重要,其对最终的传递信号质量影响极大,在实际的传输链路中,应对光纤链路中的色散进行精细化补偿。但是更需考虑到实际环境下的光纤链路,由于测量误差与模块误差等的影响,进行理想化色散补偿极为困难,需探索更加精密化的色散测量方案与补偿方式。链路中正反向激光器为规避后向散射等对系统传递的影响^[24-25],需将发送端与接收端的激光器设置为不同的波长,其对系统时延差的影响 $\Delta\tau$ 可表示为

$$\Delta\tau = LD(\lambda_1 - \lambda_2) \quad (13)$$

式中: λ_1 与 λ_2 分别为收发端的激光器波长值。在图2所示装置对激光器的相对频漂进行采样后,再利用仿真模型对收发端两台激光器的波长不对称性进行了仿真分析。

波长不对称的仿真结果如图7所示,设置正反

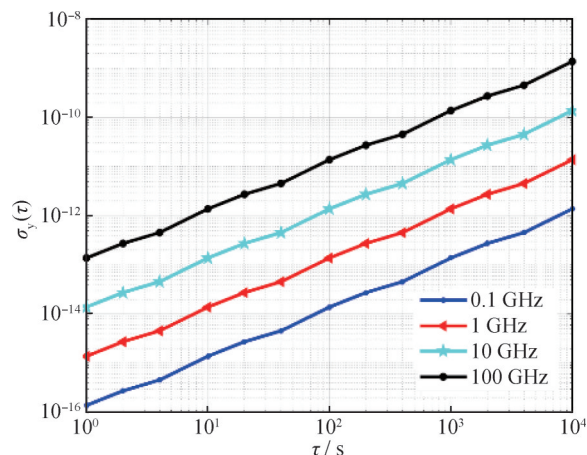


图7 光纤链路波长不对称的仿真图

Fig.7 Simulation diagram of optical fiber link wavelength asymmetry

向激光器波长差分别为0.1, 1, 10, 100 GHz,进行了频率稳定性仿真计算。当波长差值为0.1, 1, 10, 100 GHz时,传递系统在3 000 km光纤链路中的短期稳定性分别为 $1.1 \times 10^{-15}/s$, $1.4 \times 10^{-14}/s$, $1.6 \times 10^{-13}/s$, $1.5 \times 10^{-12}/s$ 。可以发现,随着收发端激光器波长差值的增大,系统的频率稳定性逐渐恶化,恶化量级达到 $10^{-13}/s$ 以上。对传输链路距离为600 km的波长进行不对称性实验,当波长差值为10, 100 GHz时,传递系统的短期稳定性分别为 $2.0 \times 10^{-14}/s$, $1.6 \times 10^{-13}/s$;这验证了仿真结果的正确性。考虑到实际传递系统中,ITU-T的标准规定为波分复用中的正反向光波长间隔设置为100 GHz。正反向波长的不对称性对频率稳定性的影响十分严重,在实际系统中应加以注意,需对激光器自身频率漂移利用温度控制、锁相环等方法加以控制^[26]。除此以外,利用精密调节进一步缩小收发端激光器的波长差值也是极为重要的。

5 结论

首先分析了温度、色散对简易传输系统的影响,得出了光纤链路中影响系统短期和长期稳定性的主要因素,即温度影响系统的长期稳定性,色散对其短期稳定性影响较大。

在此基础上,利用光学仿真软件VPI搭建了频率传递系统及3 000 km链路的仿真模型。仿真结果表明:色散补偿程度对系统的频率稳定性影响

较大,色散未补偿状态系统的频率稳定性为 $2.8 \times 10^{-12}/\text{s}$,随着色散补偿程度达到99%,系统的稳定性变为 $8.9 \times 10^{-14}/\text{s}$;另外,分析了收发端激光器的波长差对系统稳定性的影响,进行了波长不对称的仿真,结果表明:通过3 000 km光纤链路,当间隙为100 GHz时,对系统稳定性的恶化量级超过 $10^{-13}/\text{s}$,做了波长不对称实验,验证了仿真结果的正确性。相较于纯公式推导计算,系统仿真定量分析了温度不对称和波长不对称对系统稳定性的影响,对现实工作环境下的长距离光纤频率传递系统具有实际指导作用。

参考文献

- [1] CALHOUN M, HUANG S, TJOELKER R L. Stable photonic links for frequency and time transfer in the deep-space network and antenna arrays[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(10): 1931 – 1946.
- [2] 周宁. 关于计量科学技术发展若干问题的思考[J]. 计测技术, 2022, 42 (1): 1 – 8.
ZHOU N. Thoughts on the development of metrological science and technology[J]. Metrology & Measurement Technology, 2022, 42(1): 1 – 8. (in Chinese)
- [3] LISDAT C, GROSCHÉ G, QUINTIN N, et al. A clock network for geodesy and fundamental science [J]. Nature Communications, 2016, 7: 12443.
- [4] KREHLIK P, UKASZ LIWCZYŃSKI, BUCZEK U, et al. ELSTAB—fiber optic time and frequency distribution technology - a general characterization and fundamental limits [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2016, 63(7): 993 – 1004.
- [5] 许原, 姚和军, 黄艳, 等. 基于GNSS/INS联合仿真的组合导航终端测试方法研究[J]. 计测技术, 2022, 42 (2): 24 – 31.
XU Y, YAO H J, HUANG Y, et al. Study of integrated navigation terminal testing method based on GNSS/INS co-simulation. [J]. Metrology & Measurement Technology, 2022, 42(2): 24 – 31. (in Chinese)
- [6] 梁伟, 黄艳, 吴晓昱, 等. 结合电子地图的卫星导航动态定位轨迹测试方法研究[J]. 计测技术, 2022, 42 (2): 32 – 39.
LIANG W, HUANG Y, WU X Y, et al. Study of a test method for satellite navigation dynamic localization of trajectories combined with electronic maps[J]. Metrology & Measurement Technology, 2022, 42(2): 32 – 39. (in Chinese)
- [7] 白金海, 胡栋, 贡昊, 等. 里德堡原子微波电场测量[J]. 计测技术, 2021, 41 (1): 1 – 9.
BAI J H, HU D, GONG H, et al. Rydberg atomic microwave electric field measurements [J]. Metrology & Measurement Technology, 2021, 41(1): 1 – 9. (in Chinese)
- [8] PUTTNAM B, RADEMACHER G, LUIS R. Space-division multiplexing for optical fiber communications[J]. Optica, 2021, 8(9): 1186 – 1203.
- [9] FANG Z J, CHIN K K, QU R H, et al. Fundamentals of optical fibers sensors[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.
- [10] 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. Atomic, Molecular, and Optical Physics, 2008, 48(1): 35 – 41.
- [11] CUI Y J, JIANG T W, YU S, et al. Precision multiple-access rf dissemination by hybrid frequency modulation technique[C]// Conference on Lasers and Electro-Optics. San Jose: Optical Society of America, 2017.
- [12] ZHANG Z G, HOU D, LI P, et al. Long-term stability of frequency transfer over an urban fiber link using microwave phase compensation[C]// 2010 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications. IEEE, 2010.
- [13] LIN T C, WU G L, LI H W, et al. Passive phase noise compensation for fiber-optic radio frequency transfer with a nonsynchronized source [J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(10): 9 – 12.
- [14] YU L Q, RONG W, LU L, et al. Radio Frequency Transfer Over 100 km Optical Fiber by a Passive Stabilization Scheme [C]//2016 Asia Communications and Photonics Conference (ACP). Piscataway: IEEE, 2016: 1 – 3.
- [15] NING B, DU P, HOU D, et al. Phase fluctuation compensation for long-term transfer of stable radio frequency over fiber link[J]. Optics Express, 2012, 20(27): 28447 – 28454.
- [16] HE Y B, ORR B J, BALDWIN K G H, et al. Stable radio-frequency transfer over optical fiber by phase-conjugate frequency mixing[J]. Optics Express, 2013, 21 (16): 18754 – 18764.
- [17] HUANG R, WU G L, LI H W, et al. Fiber-optic radio frequency transfer based on passive phase noise compensa-

- tion with frequency dividing and filtering[J]. Optics Letters, 2016, 41(3): 626 – 629.
- [18] HEDEKVIST P O, EBENHAG S C. Time and Frequency Transfer in Optical Fibers[M]. Rijeka: InTech, 2012.
- [19] LI D L, CHENG Q M, ZHANG B F, et al. Research on the impact of optical fiber link delay fluctuation on frequency transfer stability[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 62 – 68.
- [20] 孙林, 刘宁, 蔡轶, 等. 多芯光纤通信海缆的能效理论及系统参数优化[J]. 光学学报, 2022, 42 (15): 39 – 44.
- SUN L, LIU N, CAI Y, et al. Energy efficiency theory and system parameter optimization for multi-core fiber-optic communications submarine cables[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(15): 39 – 44. (in Chinese)
- [21] KREHLIK P, SLIWICZYNSKI L, BUCZEK L, et al. Fiber-optic joint time and frequency transfer with active stabilization of the propagation delay[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2012, 61 (10) : 2844 – 2851.
- [22] 马军山. 光纤通信原理与技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2004.
- MA J S. Principle and technique of optical fiber communication [M]. Beijing: People's Post and Telecommunications Press, 2004. (in Chinese)
- [23] SASAOKA E, YAMAMOTO Y, FUJIMOTO K. Optical transmission line constituting method, optical transmission line and optical fiber, US2022006524A1[P]. 2022.
- [24] KAUR K P, RANDHAWA R, KALER R S. Performance analysis of WDM - PON architecture using different receiver filters[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(17): 4742 – 4744.
- [25] CHOW C W, TALLI G, TOWNSEND P D. rayleigh noise reduction in 10-Gb/s DWDM-PONs by wavelength detuning and phase - modulation-induced spectral broadening [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19: 423 – 425.
- [26] 刘强, 张军海, 曾宪金, 等. 锁频点连续可调的激光器稳频技术[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49 (10): 127 – 131.
- LIU Q, ZHANG J H, ZENG X J, et al. Frequency stabilization techniques for lasers with continuously adjustable locking points [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(10): 127 – 131. (in Chinese)

(本文编辑: 田艳玲)

第一作者: 李静 (1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为基于光纤的稳定频率传递。



通讯作者: 罗斌 (1983—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为量子光学与量子信息, 包括: 量子相干、电磁感生透明、快慢光及其在光通信及量子通信、量子存储中的应用; 量子传感器、原子滤光与分子滤光及其在量子探测和量子成像中的应用等。主持承担国家自然科学基金面上和青年基金、国家 863 计划等多项国家级项目。

