

引用本文:徐稼明,谢昆峰,王龙,等.基于光纤与可见光结合的短距分布式时间同步方案[J].光通信技术,2023,47(6):11-14.

基于光纤与可见光结合的短距分布式时间同步方案

徐稼明,谢昆峰,王 龙,胡 亮,陈建平,吴龟灵*

(上海交通大学 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室,上海 200240)

摘要:针对局域分布式时间同步的需求,提出了一种基于光纤和可见光结合的短距分布式时间同步方案。融合了光纤时间同步高精度与可见光时间同步高灵活性的优势,设计了相应的时间同步终端,并进行了分布式实验。实验结果表明:当光纤链路长度为 3 km 时,光纤时间同步从端与光纤时间同步主端的 3σ 钟差优于 448 ps,时间同步秒稳优于 150 ps,万秒稳优于 4 ps;当光纤链路长度为 1 km、可见光链路长度为 5 m 时,可见光时间同步从端与光纤时间同步主端的 3σ 钟差优于 1.8 ns,时间同步秒稳优于 400 ps,万秒稳优于 15 ps。

关键词:光纤时间同步;分布式时间同步;可见光通信;光测量;光纤光学

中图分类号: TN929.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2023)06-00011-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.06.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Short range distributed time synchronization scheme based on the combination of optical fiber and visible light

XU Jiaming, XIE Kunfeng, WANG Long, HU Liang, CHEN Jianping, WU Guiling*

(State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Network, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Aiming at the demand of local distributed time synchronization, a short range distributed time synchronization scheme based on the combination of optical fiber and visible light is proposed. Combining the advantages of high accuracy of optical fiber time synchronization and high flexibility of visible light time synchronization, a corresponding time synchronization terminal is designed and distributed experiments are carried out. The experimental results show that when the length of the fiber link is 3 km, the 3σ clock difference between slave and the main end is better than 448 ps, the second stability of the time synchronization is better than 150 ps, and the 10 000 second stability is better than 4 ps. When the length of the optical fiber link is 1 km and the visible light link length is 5 m, the 3σ clock difference between the slave end of the visible light time synchronization and the primary end of the optical fiber time synchronization is better than 1.8 ns, the time synchronization stability is better than 400 ps in seconds, and the time synchronization stability is better than 15 ps in 10 000 seconds.

Key words: optical fiber time synchronization, distributed time synchronization, visible light communication, optical measurement, fiber optics

0 引言

高精度时间同步在导航定位、信息通信、智慧电网等领域起着重要的支撑保障作用^[1-3]。虽然现有的卫星时间同步可实现大范围覆盖^[4-6],但不适用于强电磁和卫星信号较差等环境,如变电站、地下室。光纤传输

具有带宽大、稳定性高等优点,通过光纤传输时间同步公交车(简称光纤时间同步),其精度可达百皮秒量级^[7-8]。但光纤时间同步是有线传输,不适用于无法接入光纤的用户;而自由空间时间同步可摆脱光纤链路的限制^[9-12],提升系统的灵活性,实现用户节点的快速接入。光纤时间同步与自由空间时间同步的结合具有实现高精度、灵活时间同步的潜力。但是,现有的高精度光纤和自由空间时间同步系统的体积大、系统复杂、成本高,使得其难以适应局域多节点时间同步的应用需求。

为此,本文提出一种基于光纤与可见光结合的短距分布式时间同步方案。

收稿日期: 2023-03-20。

作者简介:徐稼明(1996—),男,硕士研究生,现就读于上海交通大学电子信息与电气工程学院电子与通信工程专业,主要研究方向为分布式时间同步,参与了基于同纤同波方案的短距分布式时间同步系统研发项目。

* **通信作者:**吴龟灵(1971—),男,博士,教授,主要研究方向为光子信息处理、光学时频传递。



1 基本原理

本文提出的基于光纤与可见光结合的短距分布式时间同步方案原理框图如图 1 所示。该系统由光纤时间同步主端、光纤时间同步从端、可见光时间同步从端组成。光纤时间同步主端由多个并行的光纤时间同步模块组成, 各个时间同步模块通过光纤与各光纤时间同步从端连接, 实现分布式光纤时间同步。各光纤时间同步模块通过编码器对本地秒脉冲 (1PPS) 信号进行编码, 再调制到光载波上发送给对应的光纤时间同步从端; 光纤时间同步从端通过部分反射镜 (PRM) 将一部分光信号沿同一条光纤链路返回到光纤时间同步主端, 并通过解码器从一部分光信号中提取出 1PPS 信号; 光纤时间同步主端通过解码器从接收的光信号中解调出 1PPS 信号, 利用时间间隔计数器 (TIC) 测得光纤时间同步主端发送的 1PPS 信号与从光纤时间同步从端返回的 1PPS 信号之间的时间间隔, 并由该时间间隔值计算出链路时延, 再通过时间延时调整模块 (TDA) 对 1PPS 信号进行延迟补偿。光纤时间同步主端、光纤时间同步从端的钟差 ΔT 表示为

$$\Delta T = T_d + \frac{1}{2} T_{AB} + \frac{1}{2} (\tau_{AB}^F - \tau_{BA}^F) + \frac{1}{2} (\tau_A^T - \tau_A^R) + \tau_B^R \quad (1)$$

其中, F、T、R 分别分表光纤、传输、接收, A、B 表示光纤时间同步主端和从端, T_d 表示延迟补偿值, T_{AB} 表示光纤时间同步主端 TIC 测得发送和接收 1PPS 信号的时间间隔, τ_{AB}^F (τ_{BA}^F) 为光纤时间同步主端到光纤时间同步从端 (光纤时间同步从端到光纤时间同步主端) 的链路传输时延, 由于光信号在光纤中环回传播, 可认为 $\tau_{AB}^F = \tau_{BA}^F$, τ_A^T 表示光纤时间同步主端的发送延迟, τ_A^R (τ_B^R) 表示光纤时间同步主端 (光纤时间同步从

端) 的接收延迟。式 (1) 中的后 3 项为固定值, 可进行标定^[13]。通过调整 T_d , 使钟差 ΔT 等于 1 s, 即可在光纤时间同步从端输出与主端同步的 1PPS 信号^[7]。

光纤时间同步从端通过波形发生器 (WG)、相位差测量 (PDM) 等的链路时延测量模块 (LDM) 测量自由空间链路时延, 据此对从主端接收到的 1PPS 信号进行时延调整, 并将调整后的 1PPS 信号编码后通过可见光通信模块发送至可见光时间同步从端。最后, 可见光时间同步从端从接收到的时间码中提取出同步的 1PPS 信号。

LDM 通过测量往返调制信号的相位差 $\Delta\phi$, 得到单向的链路时延 Δt ^[14]为

$$\Delta t = \frac{\Delta\phi}{4\pi f} \quad (2)$$

其中, f 表示调制信号的频率。

由于发光二极管 (LED) 的频率响应存在较为严重的高频衰落^[15]的问题, 导致在 1PPS 信号上升沿的抖动较大, 经往返传输后的时延测量误差更大。因此, 与往返 1PPS 信号测量链路时延的方法相比, 所提方案拥有成熟的商用模块, 精度较高且成本低。

2 实验验证

实验系统框图如图 2 所示。系统由 1 个光纤时间同步主端、2 个光纤时间同步从端、1 个可见光时间同步从端组成。系统采用铷原子钟作为基准, 编码器/解码器、TIC 和 TDA 通过现场可编程门阵列 (FPGA) 实现。光纤时间同步主端与光纤时间同步从端采用 1.25 Gb/s、1 310 nm 的光收发模块 (SFP)。可见光通信模块的光源为红光发光二极管 (LED)、探测器为 320~1 000 nm 的雪崩光电二极管 (APD)。LDM 采用低成本商用模块, 测量距离可达 80 m, 测量精度为十皮秒级。图 3 为搭建的实验系统实物图。

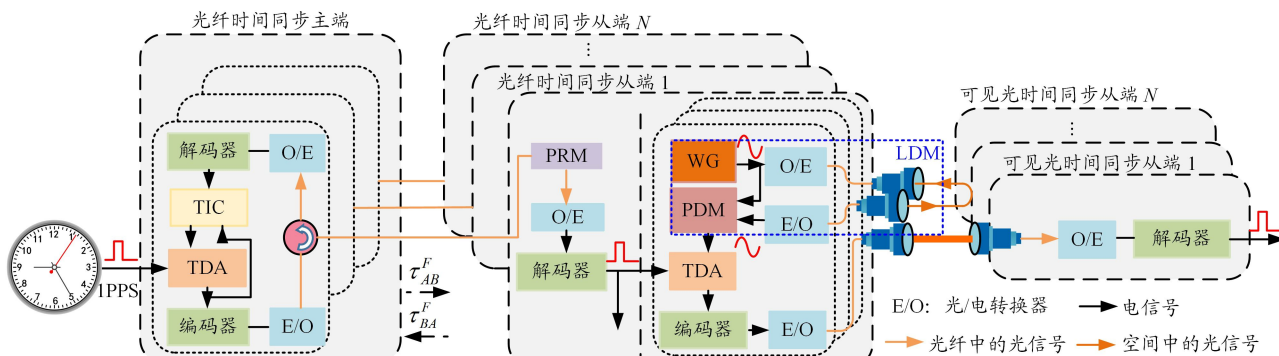


图 1 光纤和可见光结合的短距分布式时间同步原理框图

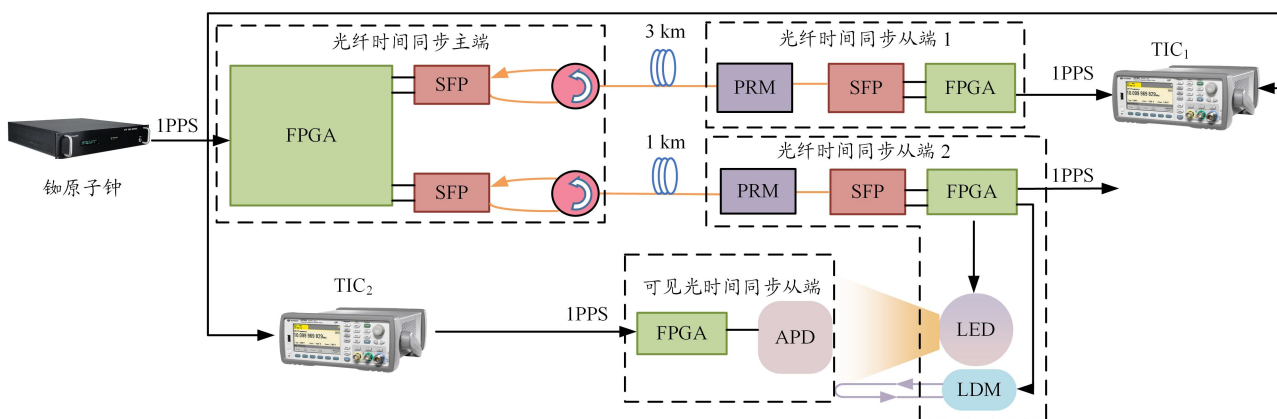


图2 光纤和可见光结合的短距分布式时间同步实验框图

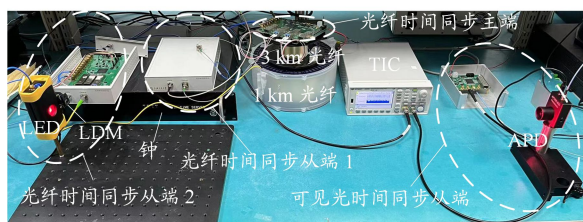


图3 实验系统实物图

在光纤链路长度为1 m、自由空间链路为0.5 m条件下,本文根据TIC₁、TIC₂的读数依次对光纤时间同步主端和光纤时间同步从端进行标定。标定后,光纤时间同步从端和光纤时间同步主端间钟差均值优于15 ps,3 σ 钟差优于380 ps。可见光时间同步从端与光纤时间同步主端间时间钟差平均值优于54 ps,3 σ 钟差优于0.9 ns。 σ 为钟差样本的标准差,3 σ 钟差定义为去除3 σ 以外的样本数据后计算所得钟差峰值。

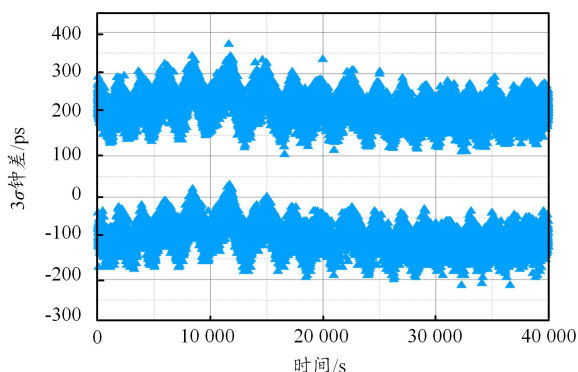
本文在光纤时间同步从端1、光纤时间同步从端2与光纤时间同步主端间光纤链路长度分别为3、1 km,光纤时间同步从端1与可见光时间同步从端间空间链路长度分别为2.5 m和5 m条件下进行测试。时间同步钟差稳定度常用时间偏差(TDEV)描述。TDEV是一种时间和相位稳定度统计方法,其表达式为

$$\sigma_x(\tau) =$$

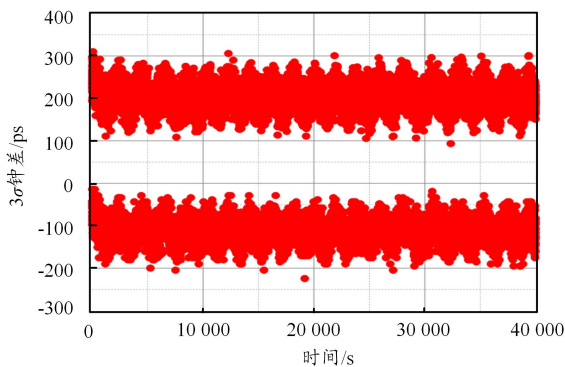
$$\sqrt{\frac{1}{6m^2(N-3m+1)} \sum_{j=1}^{N-3m+1} \left[\sum_{i=j}^{j+m-1} (x_{i+2m} - 2x_{i+m} + x_i) \right]^2} \quad (3)$$

其中, x_i 为测量时间, N 为采样点数, m 为平均因子。秒稳对应于 τ 为1 s时的TDEV,万秒稳对应于 τ 为10 000 s时的TDEV。

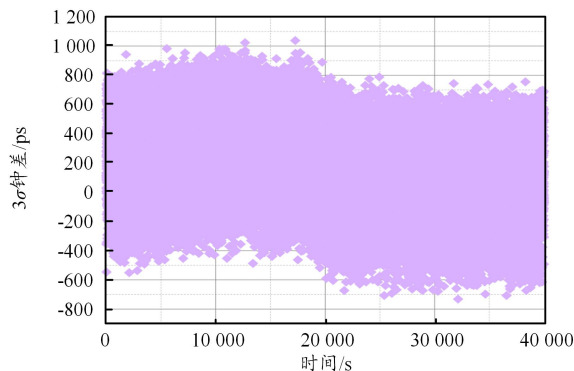
不同链路上测得的时间同步钟差如图4所示。通过计算可知,2个光纤时间同步从端与光纤时间同步主端同步的3 σ 钟差均优于448 ps,时间同步秒稳优于150 ps,万秒稳优于4 ps。可见光时间同步从端与光



(a) 光纤链路长度为3 km

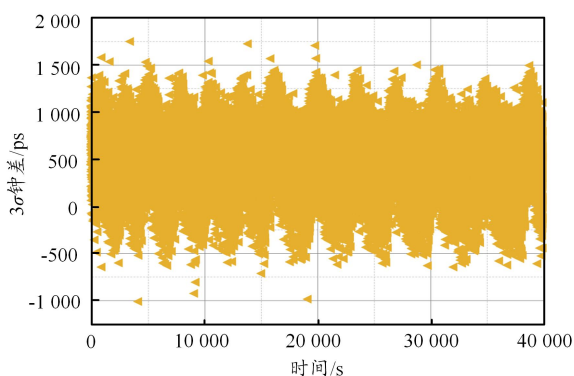


(b) 光纤链路长度为1 km



(c) 光纤链路长度为1 km+可见光链路长度为2.5 m

徐稼明, 谢昆峰, 王龙, 等: 基于光纤与可见光结合的短距分布式时间同步方案



(a) 光纤链路为 1 km+可见光链路为 5 m

图 4 不同链路上测得的时间同步钟差

纤时间同步主端同步的 3σ 钟差均优于 1.8 ns, 时间同步秒稳优于 400 ps, 万秒稳优于 15 ps。

不同链路上测得的 TDEV, 如图 5 所示。TDEV 在千秒附近的大幅度波动主要由实验室内温度波动对端机的影响引起的。可见光时间同步从端和光纤时间同步主端之间的时间同步性能主要受限于可见光通信段的性能。由于损耗随距离的增加而快速增加, 实验中可见光空间时间同步的距离最大为 5 m。若采用准直、APD 后加电放大器等方法, 还可以进一步增加可见光时间同步的距离。

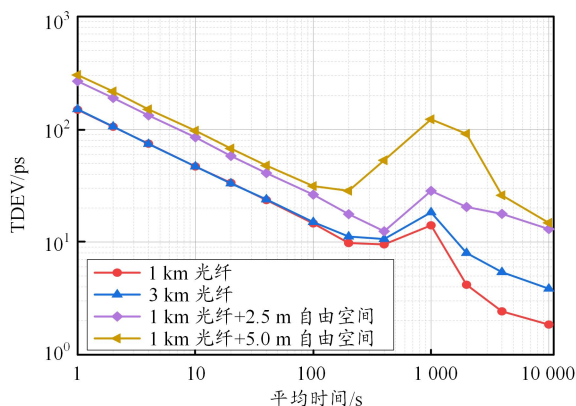


图 5 不同链路上测得的 TDEV

3 结束语

本文提出了一种基于光纤与可见光结合的短距分布式时间同步方案。该方案利用光纤传输实现多点分布式时间同步, 通过可见光传输实现了无法接入光纤用户的时间同步。本文搭建了分布式实验系统, 并进行了实验验证。实验结果表明: 当光纤链路长度为 3 km 时, 光纤时间同步的 3σ 钟差优于 448 ps, 时间同步秒稳优于 150 ps, 万秒稳优于 4 ps。当光纤链路长

度为 1 km, 可见光传输距离为 5 m 时, 可见光时间同步从端与光纤时间同步主端的 3σ 钟差优于 1.8 ns, 时间同步秒稳优于 400 ps, 万秒稳优于 15 ps。本文所提方案中的光纤传输可支持多点分布式同步, 不受卫星信号无法覆盖的影响; 同时, 可见光传输与照明设备融合, 具有可灵活布局、快速接入等优点。下一步还需要研究降低 LED 的高频衰落对 1PPS 上升沿影响的方法, 提升可见光时间同步的指标。

参考文献:

- [1] KOELEMEL J C J, DUN H, DIOUF C E V, et al. A hybrid optical-wireless network for decimetre-level terrestrial positioning[J]. Nature, 2022, 611(7936): 473–478.
- [2] LI H, HAN L, DUAN R, et al. Analysis of the synchronization requirements of 5G and corresponding solutions[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2017, 1(1): 52–58.
- [3] 陶诗涌. 基于 DSP 的 GPS 卫星接收机的研究与开发[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- [4] PIESTER D, SCHNATZ H. Novel techniques for remote time and frequency comparisons [J]. PTB Mitteilungen: Amts-und Mitteilungsblatt der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig-Berlin, 2009, 119(2): 33–44.
- [5] LEWANDOWSKI W, THOMAS C. GPS time transfer [J]. Proceedings of the IEEE, 1991, 79(7): 991–1000.
- [6] ALLAN D W, WEISS M A. Accurate time and frequency transfer during common-view of a GPS satellite[C]//IEEE. 34th Annual Symposium on Frequency Control. New York: IEEE, 1980: 334–346.
- [7] ZUO F, CHEN Z, HU L, et al. WDM-based fiber-optic time synchronization without requiring link calibration[J]. IEEE Access, 2020, 8: 114656–114662.
- [8] ZUO F, CHEN Z, HU L, et al. Multiple-node time synchronization over hybrid star and bus fiber network without requiring link calibration [J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(7): 2015–2022.
- [9] DESCHÊNES J D, SINCLAIR L C, GIORGETTA F R, et al. Synchronization of distant optical clocks at the femtosecond level[J]. Physical Review X, 2016, 6(2): 021016-1–021016-15.
- [10] YANG H, WANG H, WANG X, et al. Picosecond-precision optical two-way time transfer in free space using flexible binary offset carrier modulation[J]. OSA Continuum, 2020, 3(5): 1264–1273.
- [11] REN J, HOU D, LI Z, et al. Outdoor atmospheric optical two-way time transfer with serial time code[J]. Review of Scientific Instruments, 2021, 92(4): 045102-1–045102-6.
- [12] ZHANG Q, PANG C, WANG Y, et al. Portable system integrated with time comparison, ranging, and communication [J]. Chinese Optics Letters, 2022, 20(10): 100601-1–100601-6.
- [13] ZUO F, XIE K, HU L, et al. 13 134-km fiber-optic time synchronization[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(20): 6373–6380.
- [14] 王秀芳, 王江, 杨向东, 等. 相位激光测距技术研究概述[J]. 激光杂志, 2006, 27(2): 4–5.