

引用本文: 陈品儒, 华楠, 朱康奇, 等. 应用于光通信网络的高精度双频时间间隔测量方法[J]. 光通信技术, 2023, 47(5): 78–83.

应用于光通信网络的高精度双频时间间隔测量方法

陈品儒¹, 华楠², 朱康奇², 张振荣^{1*}, 郑小平²

(1. 广西大学 计算机与电子信息学院, 南宁 530004; 2. 清华大学 电子工程系, 北京 100084)

摘要:为了解决传统的时间间隔测量方法受到时钟分辨率和硬件成本高的限制, 提出了一种双频时间间隔测量方法。该方法通过在接收机处对接收到的时钟信号进行相位扰动或等效相位扰动, 使得接收到的时钟信号在一个待测信号周期内具有确定的相位概率分布。然后, 通过多次采样和统计计算, 消除了由低时钟分辨率引起的读数误差。仿真和实验结果表明, 双频时间间隔测量方法的测量误差为 0.06 ns, 达到了亚纳秒级的测量精度, 突破了时钟分辨率的限制。

关键词:灵活前传网络; 双频时间间隔测量; 光学雷达; 光网络

中图分类号: TN929.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2023)05-0078-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.05.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



High-precision double-frequency time interval measurement method in optical communication networks

CHEN Pinru¹, HUA Nan², ZHU Kangqi², ZHANG Zhenrong^{1*}, ZHENG Xiaoping²

(1. School of Computer, Electronic and Information, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to solve the limitation of traditional time interval measurement method which is limited by clock resolution and high hardware cost, a dual-frequency time interval measurement method is proposed. In this method, phase perturbation or equivalent phase perturbation is performed on the received clock signal at the receiver, so that the received clock signal has a definite phase probability distribution in one period of the signal to be measured. Then, through multiple sampling and statistical calculation, the reading error caused by low clock resolution is eliminated. The simulation and experimental results show that the measurement error of the dual-frequency time interval measurement method is 0.06 ns, which reaches the measurement accuracy of sub-nanosecond and breaks the limit of clock resolution.

Key words: flexible fronthaul network, double-frequency time interval measurement, optical radar, optical network

0 引言

高精度的测量方法能够得到各链路之间的延时关系, 有助于精确控制链路间的真延时^[1-2], 因此可以应用于雷达、光通信、微波光子学、激光测距、电子仪

器、航天航空等领域。在第五代移动通信(5G)灵活前传网络中, 一般采用时间间隔测量方法来测量多路动态路径到达分布单元池(DU POOL)的精确时间获取不同有源天线单元(AAU)到达 DU POOL 的时间间隔, 可大幅度降低数字信号处理的复杂度^[3-4], 并提高前传网络系统对时间间隔的精准控制。此外, 高精度的时间间隔测量还为光网络智能管控提供了更精确的时间感知支持, 这对于提升光网络系统的性能具有重要的意义。

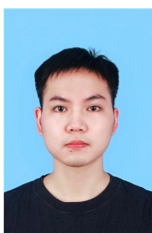
传统时间间隔测量方法包括直接计数法^[6-7]、数字双混频时差测量法。前者受限于时钟分辨率的限制, 如需达到纳秒甚至亚纳秒量级的测量精度, 需使用高频率的时钟源提高时钟频率; 后者测量精度依赖于高精度的模/数转换器(ADC)^[8-9]。虽然 ADC 可以应用于大规模光网络, 将系统时间间隔测量精度提升至亚纳

收稿日期: 2023-02-27。

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFB2903304)资助; 广西大学交叉项目(Grant No.2022JCC014)资助; 广西创新驱动专项(Grant No. 2020AA21077007)资助。

作者简介:陈品儒(1996—), 男, 硕士研究生, 现就读于广西大学计算机与电子信息学院计算机与科学技术专业, 主要从事无源光网络中的突发接收机设计、光网络系统中的时间间隔测量方法算法设计等光网络方面的研究工作。

***通信作者:**张振荣(1976—), 男, 博士, 教授, 现就职于广西大学计算机与电子信息学院, 主要研究方向为通信网络及光纤传感技术。



陈品儒, 华楠, 朱康奇, 等: 应用于光通信网络的高精度双频时间间隔测量方法

秒甚至皮秒级, 但需要添加硬件模块或者设备。

从 4G 升级到 5G 需要更换或增加大量的基站^[9], 若在现有大规模的光通信网络系统中采用传统时间间隔测量方法进行高精度的时间间隔测量, 必须进行硬件升级, 这样耗费成本高, 实施难度大。因此, 本文考虑在大规模光网络中, 基于系统原有硬件平台, 提出一种低成本、不额外添加硬件模块或设备的双频时间间隔测量方法^[10], 使系统的时间间隔测量精度提升 1~2 个数量级, 达到纳秒甚至亚纳秒级别。

1 双频时间间隔测量方法

1.1 理想情况下的双频时间间隔测量方法推导

由于温度变化和时钟老化等因素对纳秒级时钟的分辨率影响较小, 本文在推导过程中假设时钟频率为常量。双频时间间隔测量方法结构示意图如图 1 所示。

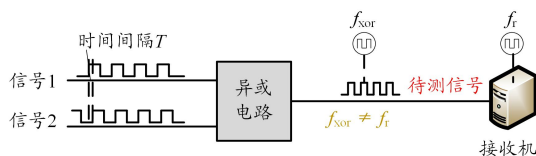


图 1 双频时间间隔测量方法结构示意图

首先, 将 2 路具有时间间隔 T 的信号经过异或电路产生异或信号。假设

$$f_{\text{xor}} : f_r = A : B \quad (1)$$

其中, f_{xor} 为 2 路具有时间间隔 T 的信号产生异或信号的频率, f_r 为接收时钟频率, A 、 B 为 2 个互质的正整数 ($A \neq B$)。

那么, f_{xor} 和 f_r 的最大公因子频率 f_{maxc} 满足

$$\begin{cases} f_{\text{xor}} = A f_{\text{maxc}} \\ f_r = B f_{\text{maxc}} \\ T_{\text{minc}} = \frac{1}{f_{\text{maxc}}} \end{cases} \quad (2)$$

其中, T_{minc} 为最小公倍数时间间隔周期。

异或信号每经过一个 T_{minc} , f_{xor} 和 f_r 的上升沿脉冲位置会出现重合。因为在一个 T_{minc} 里只有 B 个接收时钟的周期, 所以信号 f_{xor} 和 f_r 的上升沿位置关系只有 B 种可能^[11-12]。

其次, 采用类似示波器眼图的方式, 将接收时钟上升沿的脉冲标记到异或信号的一个时钟周期上, 呈等间距均匀分布^[13]。相邻标记采样点的间距 ΔT 满足

$$\Delta T = \frac{T_{\text{xor}}}{B} \quad (3)$$

其中, T_{xor} 为异或信号的周期。

然后, 采取 B 个接收时钟周期来统计在这期间采

样点落到待测信号时间间隔上的概率, 从而计算出时间间隔测量值 T_d 。

$$T_d = \frac{\lfloor T_{\text{true}} / \Delta T \rfloor}{B} \times T_{\text{xor}} \quad (4)$$

其中, T_{true} 为时间间隔真值, $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整符号, 取比自变量小的最大整数为值。

将式(3)代入式(4)可得

$$T_d = \frac{\lfloor \frac{T_{\text{true}} \times B}{T_{\text{xor}}} \rfloor}{B} \times T_{\text{xor}} \quad (5)$$

由于

$$\frac{T_{\text{true}} \times B}{T_{\text{xor}}} - 1 \leq \left\lfloor \frac{T_{\text{true}} \times B}{T_{\text{xor}}} \right\rfloor \leq \frac{T_{\text{true}} \times B}{T_{\text{xor}}} \quad (6)$$

将式(5)和式(6)结合, 可得

$$\begin{cases} T_{\text{true}} - \frac{T_{\text{xor}}}{B} \leq T_d \leq T_{\text{true}} \\ T_{\text{true}} - \frac{T_r}{A} \leq T_d \leq T_{\text{true}} \end{cases} \quad (7)$$

其中, T_r 为接收时钟的周期。

当 $A \gg 1$ 、 $B \gg 1$ 时, 有

$$\begin{cases} \lim_{A \rightarrow \infty} \frac{T_r}{A} = 0 \\ \lim_{B \rightarrow \infty} \frac{T_{\text{xor}}}{B} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

根据逼定理, 此时测量值 T_d 无限接近于真值 T_{true} 。因此, 本文通过选取一个与待测信号频率不同的接收时钟信号, 使得待测信号频率与接收时钟频率最简整数比 $A : B$ 满足 $A \gg 1$ 、 $B \gg 1$ 的条件。此条件可以为接收机处产生的接收时钟信号引入一个相位扰动, 使得接收时钟信号在一个待测信号周期内具有确定的相位概率分布, 即接收时钟上升沿脉冲标记到一个待测异或信号周期内呈等间距均匀分布。

最后, 在 $A \gg 1$ 、 $B \gg 1$ 的条件下, 通过多次采样统计计算, 消除低时钟分辨率引起的读数误差, 使得最终测量精度超越时钟分辨率 1~2 个数量级。

1.2 非理想情况下的误差分析

在实际光通信系统中, 测量精度会受到以下方面因素的影响:

1) 传输时延的不对称性: 由于光纤长度不同或者使用的传输波长不同, 2 路信号通道会产生传输时延, 这会导致 2 路信号通道的时间间隔发生变化, 从而引起对时间间隔测量的误差。但是, 这种由于传输时延的不对称性导致的时间间隔变化是相对静态的, 易于计算与补偿^[14-16]。

2)环境因素:传输过程中由环境因素所引起的传输时间间隔的变化会引起测量误差,但是这种时间间隔变化可以实时补偿,文献[17]提出了补偿方法。

3)接收时钟频率:不同的接收时钟频率将导致 A 和 B 的值不同。由式(7)可知,这个因素会导致不同的测量误差。

4)采样时间:采样时间的长短会影响到采样点数量的多少和测量误差的大小。

5)时钟精准度:由于温度、晶振老化、晶振稳定性等原因导致的时钟精准度不同^[18],使得实际的时钟频率与设置的时钟频率有所偏差,从而引起测量误差。

6)信号上升/下降时间:由于不同的信号上升/下降时间导致到达阈值电平的时间不同,会引起测量误差。

7)不同时间间隔真值:当接收时钟频率选定时,其 ΔT 也随之被确定。不同的时间间隔真值会导致不同的测量误差。

基于以上分析,本文针对接收时钟频率、采样时间、时钟精准度、信号上升/下降时间、不同时间间隔真值这些因素对测量精度造成的影响进行探究。

2 可行性与误差分析

本文为了验证所提出的双频时间间隔测量方法的可行性,采用 Matlab 软件平台在理想条件下(信号被认为是理想的方波信号)对不同接收时钟频率的情况进行了仿真。仿真参数设置如下:所需要测量的 2 路信号占空比为 1:1,周期为 40 ns,它们的时间间隔为 13.355 ns;经过异或电路后的信号 f_{xor} 为 50 MHz(T_{xor} 为 20 ns),接收时钟频率区间为 80~120 MHz,采样时间设置为 100 μs 。

2.1 可行性分析

2.1.1 不同接收时钟频率对测量精度的影响

在双频时间间隔测量方法中,用户可自行设定接收时钟频率。通过改变接收时钟频率的初始相位,探究双频时间间隔测量方法在不同接收时钟频率情况下的测量误差。仿真结果如图 2 所示。可以看出,当接收时钟频率分别为 100、109 MHz 时,测量误差分别为 6.3、0.038 ns。由于接收时钟频率不同时, A 、 B 值相应变化。当接收时钟频率为 100 MHz 时, $A:B=1:2$,此时 A 和 B 不满足 $A \gg 1$ 、 $B \gg 1$ 的条件,测量精度受限于时钟分辨率。当接收时钟频率为 109 MHz 时, $A:B=50:109$ 时,此时 A 和 B 均满足 $A \gg 1$ 、 $B \gg 1$ 的条件,测量精度超越了时钟分辨率,达到了数十皮秒量级。

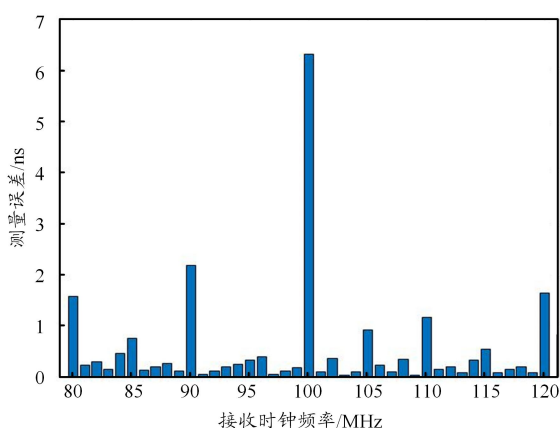


图2 不同接收时钟频率下的测量误差

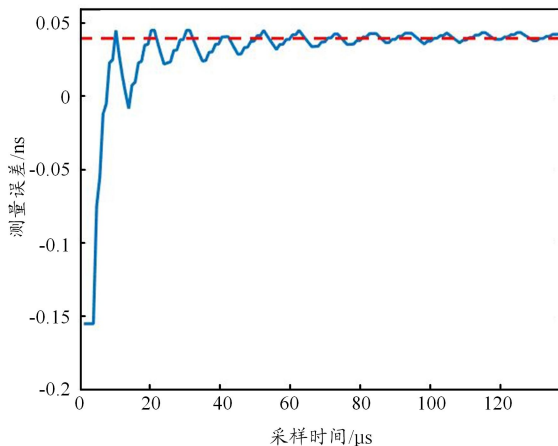
在大多数情况下,双频时间间隔测量方法中所使用的接收时钟频率,其测量精度在纳秒甚至亚纳秒级。因此,用户可以自行设定一个测量精度较高的接收频率,满足 $A \gg 1$ 、 $B \gg 1$ 的条件。

2.1.2 采样时间对测量精度的影响

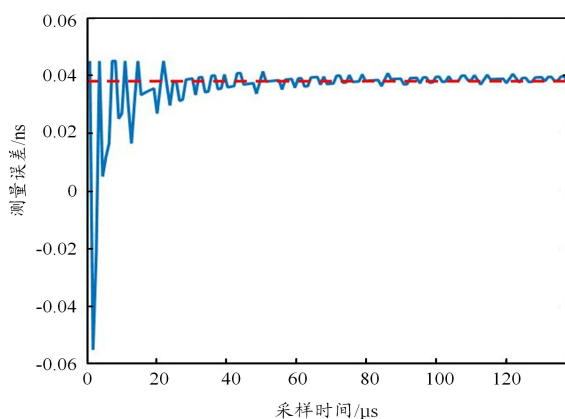
为了探究采样时间对测量精度的影响,本文在接收时钟频率分别为 103、109 MHz 时对不同采样时间进行了仿真,仿真结果如图 3 所示。可以看出,随着采样时间的增加,测量误差逐渐收敛于理论值。当接收时钟频率为 103 MHz、采样时间为 52.2 μs 时,测量误差开始收敛(收敛于 0.04 ns);当接收时钟频率为 109 MHz、采样时间为 59.3 μs 时,测量误差也开始收敛(收敛于 0.038 ns)。这表明,在不同接收时钟频率条件下,测量误差收敛的采样时间阈值不同,但都在采样时间很短时测量误差开始收敛,测量精度突破了时钟分辨率的限制,达到了亚纳秒级。

2.2 误差分析

2.2.1 时钟精准度对测量精度的影响



(a) 接收时钟频率为 103 MHz



(b) 接收时钟频率为 109 MHz

图 3 不同采样时间下的测量误差

本文在仿真中将待测信号频率设置为 50 MHz, 接收时钟频率为 109 MHz, 时钟精准度等级范围为 10^{-9} ~ 10^{-3} , 研究时钟精准度对测量误差的影响, 并得出仿真结果如图 4 所示。随着时钟精准度等级的增大, 测量误差也增大。当时钟精准度等级为 10^{-3} 时, 测量误差为 0.085 ns, 小于 0.1 ns, 满足了将系统测量精度提升至纳

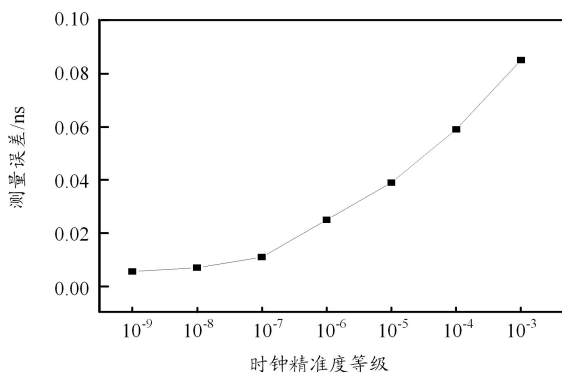
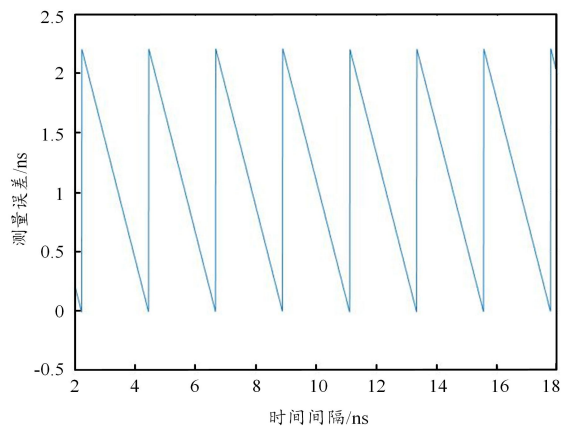


图 4 不同时钟精准度等级下的测量误差

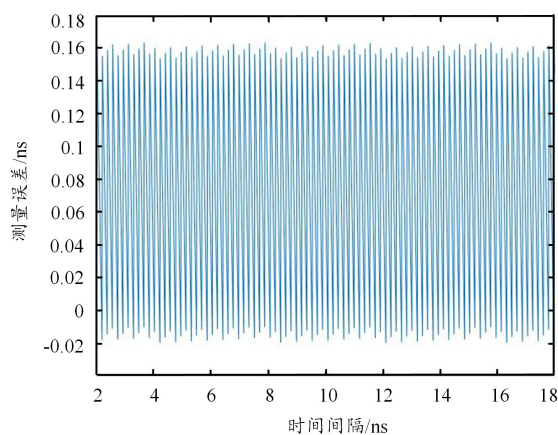
秒级甚至亚纳秒级的需求。

2.2.2 不同时间间隔真值对测量精度的影响

为了探究不同时间间隔真值 T_{true} 对测量精度的影响, 本文在接收频率分别为 90 MHz 和 109 MHz、时间间隔从 1 ns 开始递增至 17 ns (步长为 0.01 ns) 的条件下进行了测量, 得到仿真结果如图 5 所示。可以看出, 在不同时间间隔真值的情况下, 接收频率分别为 90 MHz 和 109 MHz 的测量误差均在一个范围内周期性分布, 其最大值为各自的 ΔT 。在接收时钟频率为 90 MHz 时, 其对应的 ΔT 为 2.22 ns; 在接收时钟频率为 109 MHz 时, 其对应的 ΔT 为 0.1834 ns。该结果表明, 在采样点趋于无穷大且已知待测信号周期和接收时钟频率的情况下, 不同时间间隔真值 T_{true} 造成的测



(a) 接收时钟频率为 90 MHz



(b) 接收时钟频率为 109 MHz

图 5 不同时间间隔真值下的测量误差

量误差呈周期性分布。

2.2.3 信号上升/下降时间对测量精度的影响

在实际的光通信系统中, 信号的带宽有限, 并不是理想的方波信号, 存在着上升和下降时间。为了研究信号的上升和下降时间对测量精度的影响, 本文在仿真过程中采用了 Silicon 公司的晶体振荡器 Si570、Si5348, 这些晶体振荡器的上升和下降时间最大为 350 ps^[19], 因此将系统的上升和下降时间范围设定为 10~350 ps, 接收时钟频率为 109 MHz。以 LVCOMS3.3 电平标准为例, 其最小输入高电平为 2 V。通过对接收时钟的初始相位在一定范围内进行 2 000 次遍历, 计算了在不同上升和下降时间时的测量误差。仿真结果如图 6 所示。可以看出, 随着上升和下降时间的增加, 测量误差也相应增大。当频率信号的上升和下降时间为 350 ps 时, 测量误差为 0.59 ns。这一结果表明, 在上升和下降时间较大时, 测量精度依然能突破时钟分辨率的限制, 达到亚纳秒量级的测量精度。

3 实验与结果

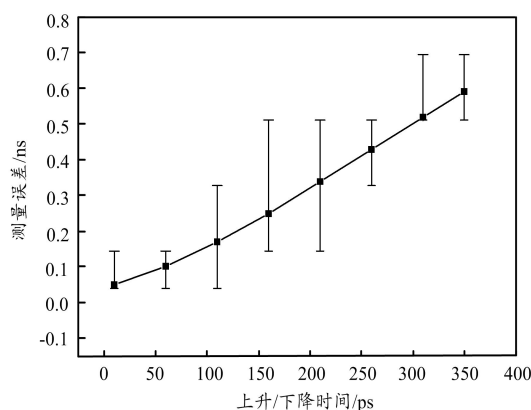
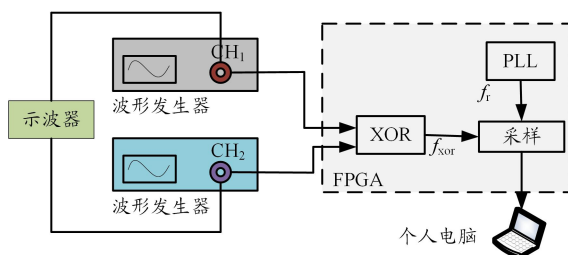
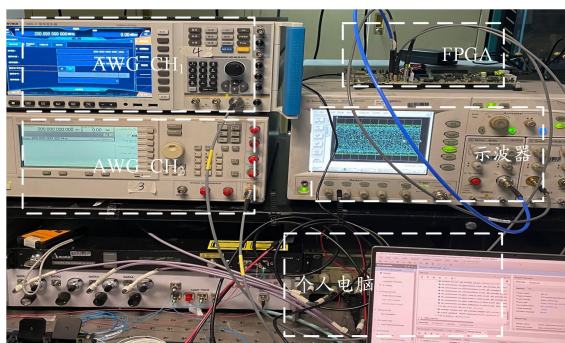


图6 不同上升/下降时间下的测量误差



(a) 原理图



(b) 实物图

图7 实验原理示意图与实物图

实验原理图与实物图如图7所示。首先,使用2台任意波形发生器(Ceyear 1465L-V, KEYSIGHT E8267D)产生2路信号(CH_1 、 CH_2),周期为40 ns、时间间隔为13.355 ns。其次,将这2路信号传到示波器(Agilent DCA-J86100C)上验证2路信号的时间间隔是否为所设置的时间间隔。然后,将验证后的2路信号传入到FPGA(Xilinx KCU105)中,经过异或电路得到异或信号 f_{xor} ,频率为50 MHz。为了满足 $A \gg 1$ 、 $B \gg 1$,由FPGA锁相环(PLL)生成一个频率为109 MHz的接收时钟对异或信号进行采样。最后,将采样数据传到个人电脑进行计算,得到测量误差。实验结果如图8所示。可以看出,当采样时间为72 μ s时,测量误差开始收敛,收敛于-0.06 ns。实验结果表明,本文提出的双频时间

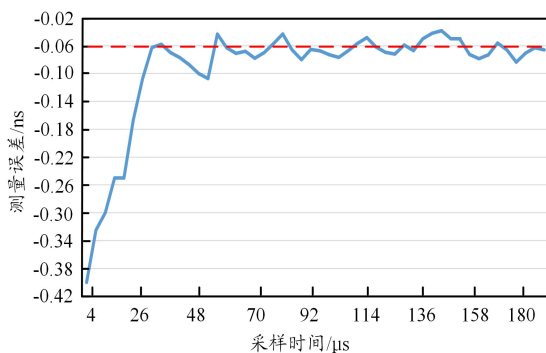


图8 实验结果

隔测量方法能够在很短的时间内使测量误差开始收敛,并突破了时钟分辨率的限制,达到了数十皮秒的测量精度。

4 结束语

高精度的时间间隔测量方法在光通信领域有着广泛的应用前景。在大型光网络中,本文提出了一种低成本、不额外添加硬件模块或设备的软升级方法,以满足系统时间间隔测量技术的升级需求。这种方法越来越受到人们的青睐。此外,本文创新性地提出了一种双频时间间隔测量方法,通过理论推导,该方法在不改变原有硬件平台的情况下,仅通过软件升级,就能提高时间间隔测量的精度1~2个数量级。实验结果表明,当接收时钟频率为109 MHz时,测量误差在很短的时间内开始减小,最终在100 MHz的FPGA上实现了亚纳秒级的测量精度,突破了时钟分辨率的限制。

参考文献:

- [1] NG W, WALSTON A A, TANGONAN G L, et al. The first demonstration of an optically steered microwave phased array antenna using true-time-delay[J]. Journal of Lightwave Technology, 1991, 9(9): 1124-1131.
- [2] CHEN X F, LI S P, WANG L H, et al. Time delay measurement of optical fiber link with spatial resolution [C]// 2021 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), October 24-27, 2021, Shanghai, China. Shanghai: IEEE, 2022: 1-3.
- [3] BENHADDOU D, HARIKUMAR M, CHEN J, et al. Coordinated multipoint user scheduling for 5G cloud radio access network [C]// 2020 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE), October 12-November 12, 2020, Vienna, Austria. Vienna: IEEE, 2020: 1-7.
- [4] ZHANG J W, JI Y F, JIA S H, et al. Improving the CoMP performance through wavelength reconfiguration in cloud radio and optical access networks[C]// 42nd European Conference on Optical Communication, September 18-22, 2016, Dusseldorf, Germany. Dusseldorf: VDE, 2016: 1-3.
- [5] 广东省工业和信息化厅. 广东省5G基站和数据中心总体布局规划(2021-2025年)[EB/OL]. (2020-06-09)[2023-03-15]. <http://gdii.gd.gov>.

cn/zcgh3227/content/post_3026281.html.

[6] WANG H, ZHANG M, YAO Q. A new realization of time-to-digital converters based on FPGA internal routing resources[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2013, 60(9): 1787–1795.

[7] 张延, 黄佩诚. 高精度时间间隔测量技术与方法[J]. 天文学进展, 2006(1): 1–15.

[8] 何慧征. 数字式双混频时差测量系统的研究设计与仿真实现[D]. 北京: 北京工业大学, 2014.

[9] 赵科佳, 张爱敏, 徐清华, 等. 数字式双混频时差测量系统的试验研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(12): 2858–2865.

[10] CHEN P R, HUA N, ZHU K Q, et al. High-precision double-frequency delay skew measurement method for coordinated multipoint transmission in 5G flexible fronthaul networks [C]// 2022 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), November 5–8, 2022, Shenzhen, China. Shenzhen: IEEE, 2023: 1219–1222.

[11] ZHOU W, XUAN Z Q, YU J G. Some new developments of precision frequency measurement technique[C]// Proceedings of the 1995 IEEE International Frequency Control Symposium (49th Annual Symposium), May 31–June 2, 1995, San Francisco, CA, USA. San Francisco: IEEE, 1995: 354–359.

[12] 李晓东. 基于相位群同步的任意频率测量研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.

[13] LUO R J, HUA N, ZHENG X P, et al. A high-reliability sub-nanosec-

ond network time synchronization method enabled by double-frequency distributed time synchronization [C]// 2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC), March 11–15, 2018, San Diego, CA. San Diego: IEEE, 2018: 1–3.

[14] WANG X C, LIU Z W, SUN D N, et al. Stable fiber delivery of terahertz wave signal by fast phase compensation system [C]// 2014 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), November 11–14, 2014, Shanghai, China. Shanghai: IEEE, 2019: 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] GABRIEL S, GABRIELE L G, POLINA B. Volterra-assisted optical phase conjugation: a hybrid optical-digital scheme for fiber nonlinearity compensation[J]. Journal Lightwave Technology, 2019, 37(10): 2467–2479.

[17] HOU D, LI P, LIU C, et al. Long-term stable frequency transfer over an urban fiber link using microwave phase stabilization[J]. Optics Express, 2011, 19(2): 506–511.

[18] LIPINSKI M, WLOSTOWSKI T, SERRANO J, et al. White rabbit: a PTP application for robust sub-nanosecond synchronization[C]// 2011 IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication, September 12–16, 2011, Munich, Germany. Munich: IEEE, 2011: 25–30.

[19] SILICON. Si570/5348 datasheet[EB/OL]. (2022–03–04) [2023–03–15]. <https://www.silabs.com/>.