

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

高精度水下激光频率传递研究进展

侯冬, 任军委, 郭广坤, 刘科

引用本文:

侯冬, 任军委, 郭广坤, 等. 高精度水下激光频率传递研究进展[J]. *光电工程*, 2023, 50(2): 220149.

Hou D, Ren J W, Guo G K, et al. Progress on high-precision laser-based underwater frequency transfer[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(2): 220149.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.220149>

收稿日期: 2022-06-30; 修改日期: 2022-12-19; 录用日期: 2022-12-23

相关论文

前向受激布里渊散射光纤传感研究进展

李天夫, 巴德欣, 周登望, 任玉丽, 陈超, 张洪英, 董永康

光电工程 2022, 49(9): 220021 doi: [10.12086/oe.2022.220021](https://doi.org/10.12086/oe.2022.220021)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



<http://cn.ojournal.org/oe>



 OE_Journal



Website

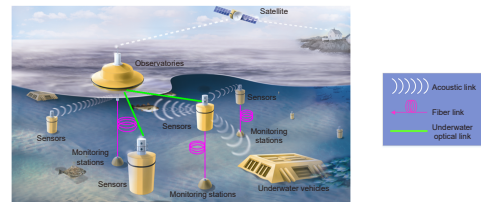


DOI: 10.12086/oe.2023.220149

高精度水下激光频率传递研究进展

侯冬*, 任军委, 郭广坤, 刘科

电子科技大学自动化工程学院, 四川 成都 611731



摘要: 相比于传统基于声纳、光缆的水下频率传递技术,水下激光频率传递技术具有更高的灵活性。本文首先介绍了水下激光频率传递技术的背景与意义,同时简要展示了国内外科研机构在水下激光频率传递方面的成果。然后,从理论上描述了水下链路特性的时域和频域特性,前者基于水体折射率微扰,后者基于柯尔莫哥洛夫大气湍流模型。接着,重点报道了电子科技大学在该领域的研究进展,包括电学相位补偿技术、光学相位补偿技术和多址频率分发技术。最后总结了这三类水下频率传递实验,对课题组在水下激光频率传递方面将要进行的工作进行了展望。作为具有较大潜力的水下频率传递技术,未来水下激光频率传递技术将在相关应用中发挥重要作用。

关键词: 时间频率计量; 水下频率传递; 定时抖动抑制; 相位补偿

中图分类号: TN929.1

文献标志码: A

侯冬, 任军委, 郭广坤, 等. 高精度水下激光频率传递研究进展 [J]. 光电工程, 2023, 50(2): 220149

Hou D, Ren J W, Guo G K, et al. Progress on high-precision laser-based underwater frequency transfer[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(2): 220149

Progress on high-precision laser-based underwater frequency transfer

Hou Dong*, Ren Junwei, Guo Guangkun, Liu Ke

School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China

Abstract: Inspired by underwater wireless optical communication, laser-based underwater frequency transfer technology extends frequency transfer and dissemination from fiber links and free-space links to underwater links and shows greater potential for applications. Compared with traditional underwater frequency transfer technologies (sonar, fiber links), laser-based underwater frequency transfer technology is more flexible and avoids the multipath effect and high latency. In the future, this technology is expected to contribute to the applications of underwater navigation and sensing, distributed observation networks, tracking and positioning systems, etc. This paper first introduces the background and significance of the underwater laser-based frequency transfer technique, and briefly shows the achievements of domestic and foreign scientific research institutions in underwater laser-based frequency transfer. Next, the paper presents the time domain and frequency domain descriptions of underwater link properties, in which the former is based on the refractive index perturbation of the water column and the latter is based on the Kolmogorov atmospheric turbulence model. Then, the research results of the University of Electronic

收稿日期: 2022-06-30; 修回日期: 2022-12-19; 录用日期: 2022-12-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61871084, 62271109); 四川省应用基础研究项目 (2019YJ0200); 军委装备发展部预研共用技术项目 (315067206, 315067207)

*通信作者: 侯冬, houdong@uestc.edu.cn。

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

Science and Technology in laser-based underwater frequency transfer are reported, including the electrical phase compensation technique, the optical phase compensation technique, and the multiple-access frequency dissemination technique. Finally, the three laser-based underwater frequency transfer experiments are summarized, and the future works of our group in laser-based underwater frequency transfer have been prospected. As a promising underwater frequency transfer technology, laser-based underwater frequency transfer technology will play a crucial role in relevant applications in the future.

Keywords: metrology of time and frequency; underwater frequency transfer; timing fluctuation suppression; phase compensation

1 引言

地球的陆地覆盖率约为 30%，积极探索海洋对人类社会发展具有重大意义。对海洋及湖泊等大面积水体进行地质勘测、资源勘探、水体动态智能化监测等科学实验时，需要在水体内大量部署水下传感器节点，以构成分布式观测网络。观测节点的时基精度会影响到节点间的钟差，而频率信号的传递精度直接关系到观测节点的时基精度。类似于陆地上和空间中观测目标的位置信息获取，水下（移动）目标也需要实时导航、跟踪和定位。在自由空间环境下，卫星导航系统能够提供观测目标近乎实时的位置信息。在水下环境中，也有获取观测目标实时位置信息的迫切需求。在水下环境中建立类似于卫星导航系统的时频网络，将有助于水下移动目标间的高度协同运作。

在过去的几年里，水下环境中的光信号传输^[1-3]在水下通信领域得到了广泛的应用。这种水下光传输比传统的水下通信方式更加灵活和高效，例如海底光纤通信^[4-5]、声纳通信^[6-7]和微波通信^[8]。海底光纤网络

虽然可以提供高带宽、高可靠性的通信，但只能在静止目标间使用，缺乏灵活性。对于不可或难以铺设光缆的场合，此方法表现出极大的局限性。当前较为成熟的技术是声纳技术，在水中发射的声波可以传播较长的距离（百米量级）。然而，声波在水中会受到较高的衰减，且传输带宽很低，同时伴随着时变多径效应和高的传输延迟。在自由空间环境下，微波通信具有高带宽、高可靠性、高灵活性等优势。然而，微波信号在水体中的趋肤深度只有厘米量级，绝大部分信号功率会被水体吸收，这限制了水下微波通信的实用化。自然水体对蓝绿波段的激光表现出较小的吸收率^[9]，因此，作为水下通信中最具潜力的技术，光信号的水下传输得到了长足的发展。实验研究表明，基于绿光二极管激光器的高带宽水下无线光通信具有较高的可行性^[10-17]。随着水下无线光通信技术的发展，水下环境中各观测目标之间的激光时频传递与同步得以实现。水下激光时频传递技术可广泛应用于水下同步、水下导航、水下计量^[18-19]等领域，未来该技术将有助于构建水下时频网络，典型的如图 1 所示。

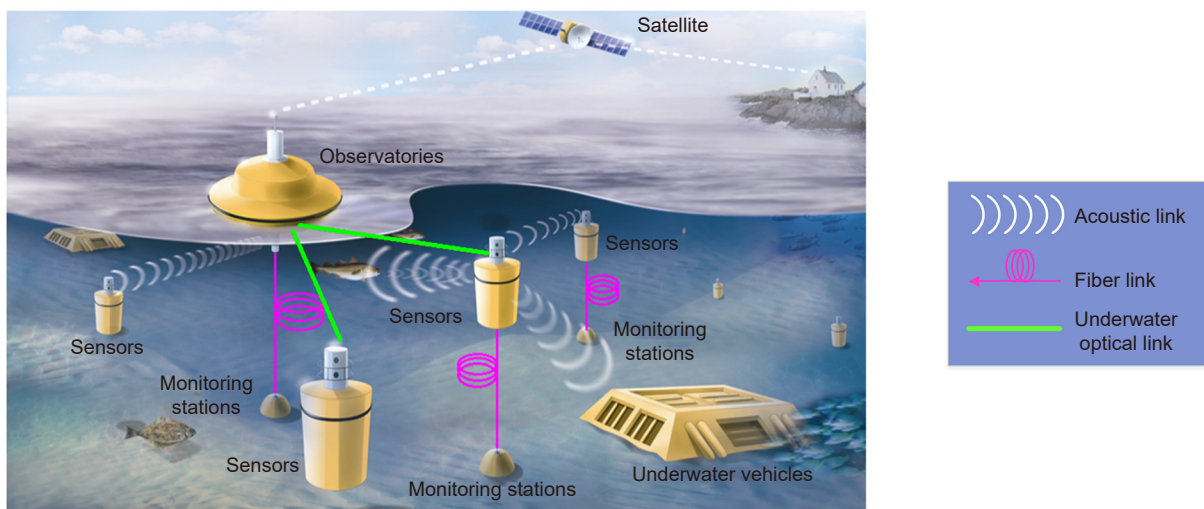


图 1 水下时频网络

Fig. 1 Underwater time-frequency networks

在过去的几年里, 时间和频率信号的直接光学传递已经在自由空间链路上实现^[20-25]。自由空间频率传递具有较为成熟的理论体系, 且已经进行了大量的实验验证^[26-31]。对于水下链路, 虽然目前没有较为完备的激光频率传递分析理论, 但作为其基础水下激光传输技术, 在近十年内取得了飞速发展, 多个国内外科研机构在该方向上开展了研究。2009年美国海军航空系统司令部首次对高频调制激光在水下的幅度传输特性进行了实验分析, 获得了频率信号受水流影响导致幅度波动的特性曲线^[32]。2011年该司令部又对高频调制激光在水下的传输散射特性进行了实验分析, 获得了频率信号受水流影响产生散射的特性曲线^[33]。2017年该司令部再对高频调制激光在水下的相位传输特性进行了实验分析, 获得了频率信号受水流影响导致相位波动的特性曲线^[34]。2014年美国海军空战中心利用双高频调制激光, 结合信号处理算法设计了水下测距实验, 获得了极高的水下目标测距精度, 这是水下激光传输的一个典型成功案例^[35]。2016年俄罗斯科学院应用物理研究所的研究团队对窄线宽激光水下传输进行了理论分析, 建立了水下激光的电磁场传播模型, 该模型可以用来评估连续激光在水下的传输特性^[36]。2017年美国海军研究实验室研究了水下温漂对激光光束传播的影响, 给出了理论分析过程并通过实验进行了验证^[37]。除了对激光在水下传播特性的研究, 在水下激光光通信方向也有很多的研究报道。2015年日本山梨大学研究组, 采用通用蓝光激光作为光源, 在 4.8 m 距离的水下环境实现了 1.45 Gb/s 速率的数据通信^[38]。2016年印度 NorthCap 大学研究组对水下光通信技术与传统的水声和微波传输技术进行了对比, 明确了水下光通信技术在带宽和传输方向稳定性上的优势。2016年浙江大学研究组利用 OFDM 编码技术, 采用通用蓝光 LED 作为光源, 在 2 m 距离的水下环境实现了 161 Mb/s 速率的数据通信^[39]。2017年复旦大学研究团队用绿光半导体激光器, 在

34.5 m 的距离上实现了 2.7 Gb/s 速率的数据通信^[40]。2018年复旦大学相同团队又实现了基于水下白光传输的高带宽数字通信技术, 在 2.3 m 距离的水下环境实现了 3.2 Gb/s 速率的数字通信^[41]。

在以上水下激光传输理论和实验的基础上, 考虑到水体与大气具有物理上的相似性, 自由空间频率传递的相关理论可以扩展到水下频率传递中, 借此可对水下链路特性进行近似分析。本文第二部分将对水下链路特性的理论体系进行详细介绍。第三至第五部分主要介绍电子科技大学在水下激光频率传递方面的最新研究成果。第三部分将详细介绍电学相位补偿技术在水下激光频率传递中的应用。第四部分将详细介绍基于光学相位补偿技术的水下激光频率传递。第五部分将详细介绍基于终相位补偿技术的水下多址激光频率分发技术。最后, 第六部分对课题组在水下激光频率传递方面工作进行总结并对将要开展的工作进行展望。

2 水下链路特性

典型水下激光频率传递系统如图 2 所示。在本地端 (local site), 通过幅度调制的方式将频率信号 (frequency source) 加载到蓝绿波段连续激光 (laser) 上。经扩束镜 (telescope) 准直后, 已调激光束穿过水体, 到达远端 (remote site)。在远端, 用扩束准直元件 (telescope) 汇集激光束, 利用光电探测器 (photodiode) 即可恢复出频率信号。对移相器 (phase shifter) 进行精密调节, 可实现本地端与远端的定时抖动抑制, 从而实现本地端到远端的频率传递。

实际上, 已调激光束在水中传输时, 水体中的溶解质、叶绿素、悬浮颗粒等会引起光功率衰减、光束散射、光束漂移、光强起伏等问题^[11,42]。但对于水下激光频率传递, 上述因素不是频率信号定时抖动的主要来源。此外, 在此过程中, 水体流速的局部不均匀和水体温度漂移引起的水下湍流会使得远端已调激光



图 2 水下激光频率传递系统

Fig. 2 Configuration of a underwater frequency transfer system

束的到达时间呈现出随机波动^[43-45]。这会使得在远端恢复出的频率信号表现出随机的定时抖动, 导致信号的频率稳定度降低。然而, 目前还没有完整的数学模型来表征水下湍流对频率信号定时抖动的影响。考虑到水下链路自由空间链路具有物理上的相似性(两者最大的区别在于对光功率的散射和衰减系数不在同一量级), 水下湍流的物理机制类似于大气湍流, 因此自由空间光传输中的 Kolmogorov 功率谱模型可以用于对水下链路特性进行近似分析。本质上, 水体流速的局部不均匀和水体温度漂移均是通过改变水体折射率的方式作用于激光束的传输延迟的, 二者引起的折射率微扰造成频率信号的定时抖动。相比频域的定时抖动功率谱, 折射率微扰引起的定时抖动在时域上的描述则使得定时抖动形成机理更容易理解。下面对两者进行详细介绍, 并报道频域描述的实验研究结果。

2.1 时域描述

考虑水下激光传输链路上的水流速度不均匀的情况, 即链路上的水流速度与位置有关, 此时激光传输延迟不与链路长度成正比。记沿着激光束传播方向距本地端 l 米处的水体流速为 $v(l)$, 由水体流速不均匀引起的折射率微扰可表示为 $\delta n = n[l - v(l)t]$, 于是水体折射率可表示为^[46]

$$n(l, t) = n_0 + n[l - v(l)t], \quad (1)$$

式中: n_0 是水温为 25 °C 激光波长为 520 nm 时水体折射率平均值。考虑一段极小的传输链路 dl , 由此链路引入的激光传输延迟为

$$d\tau_1(t) = c^{-1}n(l, t)dl, \quad (2)$$

式中: c 为真空中光速。对于长度为 L 的传输链路, 激光传输延迟为

$$\tau_1(t) = c^{-1} \int_0^L [n_0 + n(l - v(l)t)]dl. \quad (3)$$

一般来说, 水体折射率是温度、波长、质量密度和饱和压力的非线性多元函数^[47]。对于水下激光频率传递, 波长、质量密度和饱和压力可看作常数。因此, 水体折射率是温度的单变量函数, 折射率与温度之间的关系可近似表示为^[48]

$$\begin{aligned} n(T) = & 1.31405 + (1.799 \times 10^{-4} - 1.05 \times 10^{-6}T \\ & + 1.6 \times 10^{-8}T^2)S_0 - 2.02 \times 10^{-6}T \\ & + (15.868 + 0.01155S_0 - 0.00423T)\lambda_0^{-1} \\ & - 4382\lambda_0^{-2} + 1.1455 \times 10^6\lambda_0^{-3}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中: T 表示水体温度, S_0 表示盐度, λ_0 表示激光中

心波长。当传输链路周围水体温度随位置和时间变化时, 水体折射率将是位置和时间的函数, 此时水体折射率可表示成 $n[T(l, t)]$ 。考虑一段极小的传输链路 dl , 由此链路引入的激光传输延迟为

$$d\tau_2(t) = c^{-1}n[T(l, t)]dl. \quad (5)$$

对于长度为 L 的传输链路, 激光传输延迟为

$$\tau_2(t) = c^{-1} \int_0^L n[T(l, t)]dl. \quad (6)$$

由此可见, 传输链路上水体流速不均匀和温度漂移引起的折射率微扰噪声激光传输延迟是时间的函数, 即存在延迟抖动, 这是造成远端恢复的频率信号存在定时抖动的主要原因。这里只考虑了水体流速与激光传播方向平行的情况。

2.2 频域描述

水下光传输中的 Kolmogorov 功率谱模型是以功率谱密度 (power spectrum density, PSD) 的形式给出的, 是一种三维空间谱密度。它描述了由水下湍流引起的折射率微扰所造成的相位噪声分布情况^[45]

$$\Phi_n^k(\kappa) = K_3\kappa^{-11/3}, \quad (7)$$

式中: $K_3 = X\varepsilon^{-1/3}$ (X 表示温度梯度的强度, ε 表示动能耗散率) 为湍流强度常数, 通常在 $10^{-14} \sim 10^{-8} \text{ m}^{-2/3}$ 之间, κ 为标量空间频率, 单位为 rad/m。在水流速度恒定的冻结湍流假设下, 可将三维空间 PSD 简化为一维 PSD。根据自由空间光通信的理论分析和方程 (7), 水下光传输链路中相位谱的 Kolmogorov 模型可表示为^[11]

$$S_\varphi(f) = 0.016 \frac{1}{(2\pi c_0/\lambda_0)^2} k^2 K_3 L V^{5/3} f^{-8/3}, \quad (8)$$

式中: c_0 为激光在水中的传播速度, k 为波数, V 为水流速度, $S_\varphi(f)$ 表示定时抖动中所包含的频率成分及相对强度, 单位为 rad^2/Hz 。

这里的假设是水下传输链路位于层流内, 即水体是平行于传输链路流动的。而实际的水下传输链路周围还存在对流, 即水流方向与激光传播方向存在不为零的夹角。对方程 (8) 予以修正, 便得到 von Kármán 模型^[11]

$$\begin{aligned} S_\varphi(f) = & 0.016 \frac{1}{(2\pi c_0/\lambda_0)^2} k^2 K_3 L V^{-1} [(f/V)^2 \\ & + (1/2\pi L_0)^2]^{-4/3}, \quad 0 < f < V/l_0, \end{aligned} \quad (9)$$

式中: L_0 为湍流外部尺度, l_0 为湍流内部尺度, 两者的相对大小与湍流强度有关。可见由水下湍流引起的定时抖动成分及强弱与湍流强度、传输链路长度、水

体流速等因素有关。

据此, 进行了仿真和实验研究^[49]。对长度分别为 3 m、6 m 和 9 m 的水下传输链路所造成定时抖动的 PSD 进行了仿真分析, 仿真结果如图 3 所示。可以发现, 长的链路长度会产生更强的定时抖动。在描述低频定时抖动方面, von Kármán 模型更接近实际情况, 这主要是由于此模型考虑了湍流的内外尺度, 而内外尺度与湍流强度直接相关。

在长度分别为 3 m、6 m 和 9 m 的水下传输链路上进行了频率传递。实验所测得的定时抖动曲线如图 4 所示, 其均方根 (root mean square, RMS) 定时抖动分别为 5.9 ps、6.4 ps 和 8.4 ps。测量本底定时抖动如图 4(d) 所示, 其 RMS 值为 814 fs。由于实验中所使用的水箱位于开窗的室内, 空气流动会造成水箱内水体流动, 可以认为水下传输链路上的湍流仅由水体流速不均匀引起。由实验结果可知, 水下湍流会造成频率信号的定时抖动恶化, 且这种恶化是随机的。在复杂水下环境进行激光频率传递时, 湍流强度会更大, 由此引起的频率信号定时抖动更明显。因此, 需要借助相关技术抑制定时抖动, 下面报道本课题组提出的三种定时抖动抑制 (相位补偿) 技术。

3 电学相位补偿技术

实验研究表明, 采用水下链路进行高精度频率信号传递时, 各种环境因素, 如水下湍流、平台的振动、

以及环境的温度变化等因素会造成传输光程的极大波动, 进而导致光信号相位的波动, 等效于附加在原频率信号上的定时抖动^[42,46,49]。显然, 最直接的定时抖动抑制方法是对传递的频率信号进行相位补偿, 使得补偿的相位能够抵消传输链路引起的相位波动。电学移相技术在微波信号传输及处理领域得到了广泛的应用, 此技术在频率传递领域也具有应用潜力。

为此, 课题组在 2019 年进行了相关实验研究, 利用电学相位补偿技术在 5 m 水下链路上传递了 100 MHz 射频信号, 利用电学相位补偿技术成功地将 5000 s 内的 RMS 定时抖动由 9.6 ps 降低至 2.1 ps^[50]。实验结果有力地证明了将电学相位补偿技术应用于水下激光频率传递的可行性较高。所设计的实验方案如图 5 所示, 100 MHz 射频信号在发送端 (transmitter) 经相位补偿后调制到连续激光上, 激光束经水下链路传递到接收端 (receiver), 在接收端用光电探测器 (PD1) 即可从激光束中恢复出传递的射频信号。

电学相位补偿原理描述如下。记频率源所产生射频信号的初始相位为 φ_0 , 移相器 (PS) 给射频信号施加的相移为 φ_c 。用幅度调制的方式, 将移相后的射频信号加载到连续激光器 (CW laser) 上, 激光束穿过水下链路到达接收端, 半反射镜 (HM) 将一半激光功率反射回发送端, 另一半激光功率将作用于光电探测器 PD1 上。由于水下湍流的作用, 传输链路会给射频信号施加一个相位波动 φ_p , 因此接收端恢复的射频

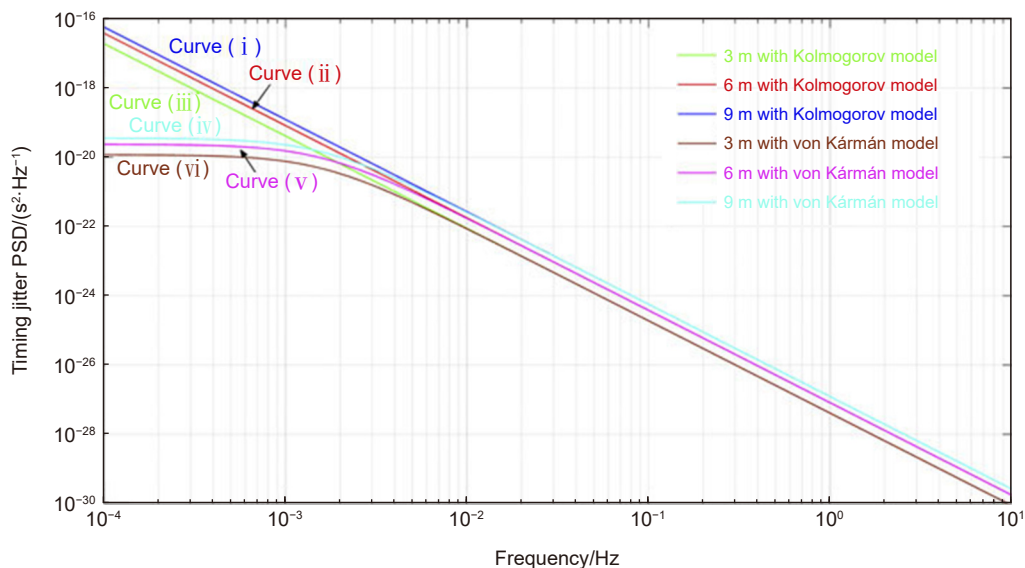


图 3 定时抖动 PSD 仿真结果^[39]。曲线 (i)–(iii) 由 Kolmogorov 模型计算; 曲线 (iv)–(vi) 由 von Kármán 模型计算

Fig. 3 Simulation results of timing jitter PSD^[39]. Curves (i)–(iii) are calculated from the Kolmogorov model;

Curves (iv)–(vi) are calculated from the von Kármán model

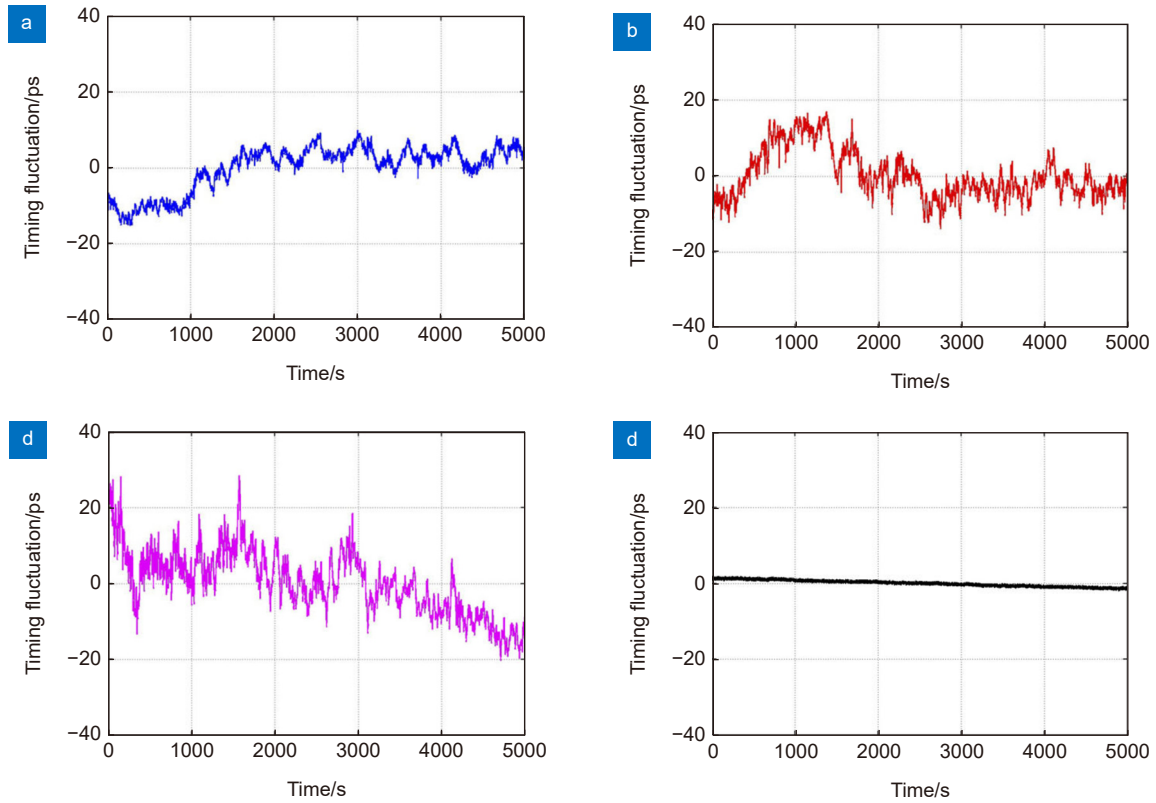


图 4 定时抖动曲线^[49]。(a) 链路长度为 3 m; (b) 链路长度为 6 m; (c) 链路长度为 9 m; (d) 测量本底

Fig. 4 Timing fluctuation curves^[49]. (a) Timing fluctuation of the underwater transmission link of 3 m; (b) Timing fluctuation of the underwater transmission link of 6 m; (c) Timing fluctuation of the underwater transmission link of 9 m; (d) Measurement floor for a short link

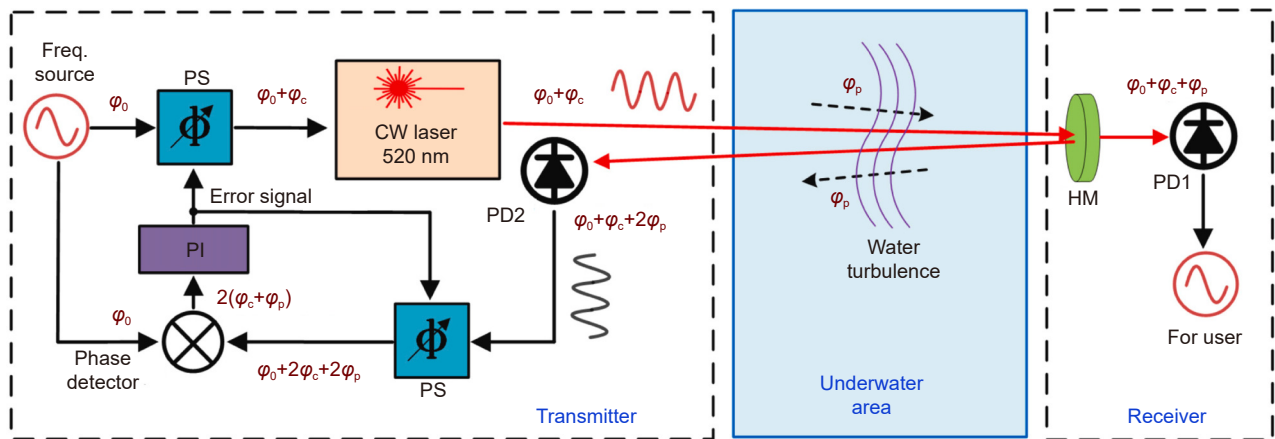


图 5 基于电学相位补偿技术的水下激光频率传递^[50]。PS: 移相器; CW: 连续波;

PD: 光电探测器; PI: 比例-积分控制器; HM: 半反射镜

Fig. 5 Laser-based underwater frequency transfer based on electronic phase compensation^[50]. PS: phase shifter; CW: continuous wave; PD: photodetector; PI: proportion-integration controller; HM: half reflected mirror

信号具有的相位为 $\varphi_0 + \varphi_c + \varphi_p$ 。在发送端用光电探测器 PD2 探测反射回来的激光, 由于激光束两次穿过水下链路, 因此所恢复出来的射频信号具有的相位为 $\varphi_0 + \varphi_c + 2\varphi_p$ 。将此射频信号再次移相, 得到相位为 $\varphi_0 + 2\varphi_c + 2\varphi_p$ 的射频信号, 然后将该射频信号与传递

的射频信号接入相位检测器 (phase detector) 进行相位监测, 得到含有相位波动信息 $2(\varphi_c + \varphi_p)$ 的中频信号。将该中频信号接到比例-积分控制器 (PI), 控制器输出两路误差信号 (error signal) 去调节两个移相器产生的相移 φ_c 。当伺服环路锁定后, 误差信号接近零, 此时

鉴相器中频输出接近零, 有 $\varphi_c + \varphi_p = 0$, 即移相器产生的相移抵消了链路带来的相位波动。那么接收端所恢复射频信号的相位为 φ_0 , 从而实现稳定的频率传递。

本次水下激光频率传递实验的测试结果如图6所示。图6(a)为测得的定时抖动曲线, 其中曲线(i)表明在无相位补偿的情况下, 5000 s内该100 MHz频率信号的RMS定时抖动为9.6 ps。曲线(ii)表明, 采用电学相位补偿技术, RMS定时抖动减小至大约2.1 ps。此外, 我们还测量了实验装置的背景噪声, 即激光器的输出直接作用于PD2时的RMS定时抖动, 曲线(iii)显示实验装置的光路及电子线路背景噪声所形成的本底RMS定时抖动1.3 ps。可见, 使用电学相位补偿后, 传输链路造成的定时抖动能被有效抑制。

图6(b)为由定时抖动数据计算的阿伦方差, 其中曲线(i)显示在无相位补偿的情况下, 该频率传递系统的阿伦方差在1 s时为 2×10^{-12} , 在1000 s时达到 7×10^{-15} 。曲线(ii)显示经过电学相位补偿后, 该频率传递系统的阿伦方差降低到在1 s时为 5×10^{-13} , 在1000 s时为 7×10^{-16} 。这里, 曲线(iii)表示该频率传递系统本底噪声带来的频率不稳定性。可见, 相比于没有进行相位补偿时的频率稳定度, 采用电学相位补偿技术能将频率稳定度提升大约一个量级。

4 光学相位补偿技术

先前的实验表明, 幅度调制的蓝绿波段激光用于

在水下链路上传递100 MHz射频信号, 其中由水下湍流引入的定时抖动通过电学相位补偿技术得到抑制。然而, 在该方案中, 两个移相器之间的残余定时漂移和较低的射频频率限制了相位补偿的分辨率, 从而定时抖动只能抑制在皮秒量级^[51]。此外, 移相器的相位补偿带宽也是有限的, 无法抑制高频的定时抖动。移相器本质上是非线性电子器件, 在其工作时会给传递的射频信号引入大量的噪声, 此噪声无法借助其他手段消除。这两个原因导致基于电学相位补偿技术的水下频率传递系统的本地频率稳定度较低, 从而限制了所传递射频信号频率稳定度的提升空间。

为此, 在2020年课题组提出了基于光学相位补偿技术的水下频率传递方案^[51]。在5 m水下链路上传递了500 MHz射频信号, 利用光学相位补偿技术成功地将5000 s内的RMS定时抖动由7.3 ps降低至0.162 ps。实验结果有力的证明了将光学相位补偿技术应用于水下激光频率传递的可行性较高。所设计的实验方案如图7所示, 500 MHz射频信号在发送端(transmitter)以幅度调制的方式加载到连续激光上, 激光束经光学延迟线进行相位补偿后, 进入水下链路传递到接收端(receiver), 在接收端用光电探测器(PD1)即可从激光束中恢复出传递的射频信号。

光学相位补偿原理描述如下。如图7所示, 我们假设频率源产生的射频信号具有初始相位 φ_0 。因此, 调制后的激光束的初始相位为 φ_0 。然后该光束在发射到水下链路之前由光学延迟线(optical delay line,

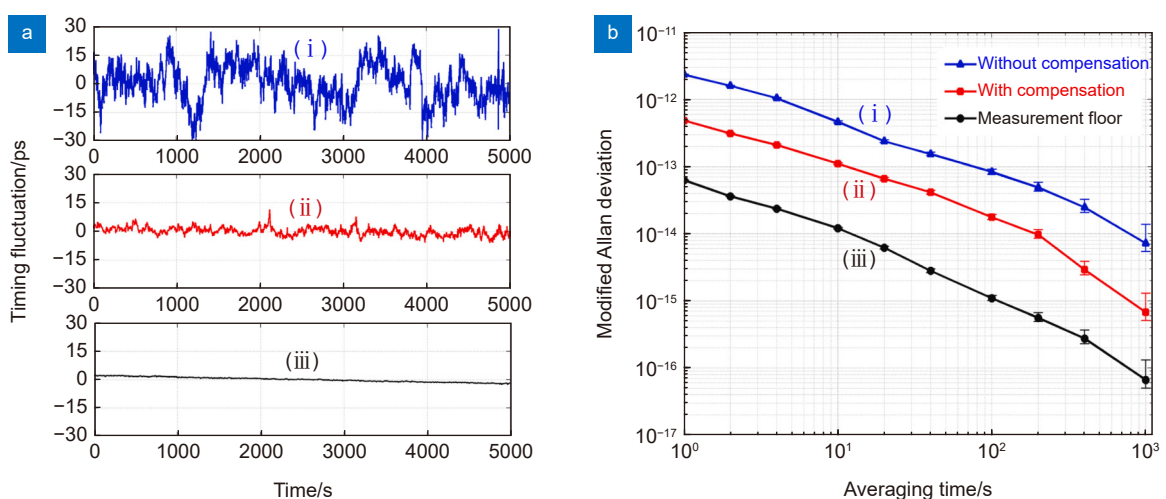


图6 实验结果^[50]。(a) 定时抖动曲线: (i)-无补偿; (ii)-有补偿; (iii)-测量本底;

(b) 阿伦方差曲线: (i)-无补偿; (ii)-有补偿; (iii)-测量本底

Fig. 6 Experimental results^[50]. (a) Timing fluctuation curves: (i)-without compensation; (ii)-with compensation; (iii)-measurement floor;

(b) Allan deviation curves: (i)-without compensation; (ii)-with compensation; (iii)-measurement floor

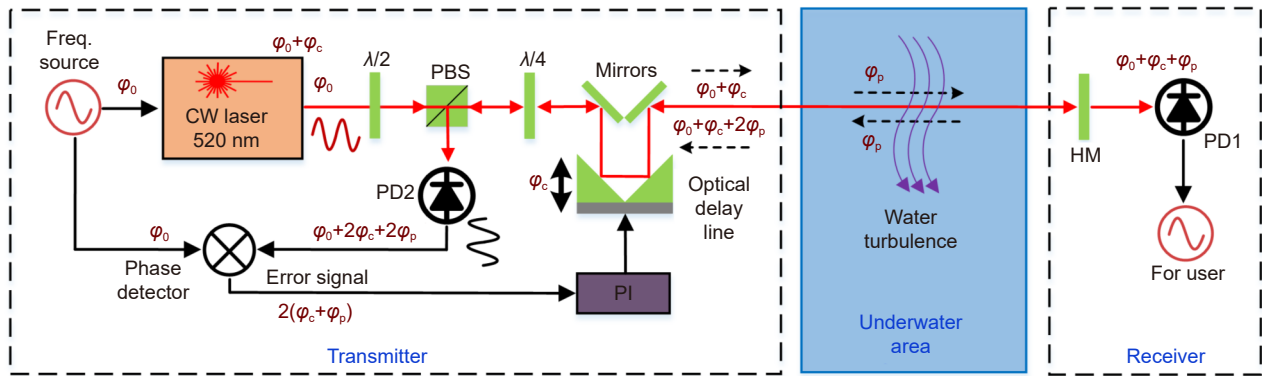


图 7 基于光学相位补偿技术的水下激光频率传递^[51]。CW: 连续波; $\lambda/2$: 半波片; PBS: 偏振分束器; $\lambda/4$: 四分之一波片; PD: 光电探测器; PI: 比例-积分控制器; HM: 半反射镜

Fig. 7 Laser-based underwater frequency transfer based on optical phase compensation^[51]. CW: continuous wave; $\lambda/2$: half-wave plate; PBS: polarization beam splitter; $\lambda/4$: quarter-wave plate; PD: photodetector; PI: proportion-integration controller; HM: half reflected mirror

ODL) 增加相移 φ_c 。在水下区域, 由水下湍流引起的前向传输链路的相位波动假设为 φ_p 。因此, 从接收端 (receiver) 上的光电探测器 (PD1) 恢复的射频信号的总相位延迟为 $\varphi_{\text{total}} = \varphi_0 + \varphi_c + \varphi_p$ 。反射光束从接收端到发送端 (transmitter) 通过相同的水下链路, 因此引入了相同的相位波动 φ_p 。这里, 到达发送端的返回光束的相位延迟为 $\varphi_{\text{total}} = \varphi_0 + \varphi_c + 2\varphi_p$ 。通过 ODL 引入另一个相位延迟 φ_c , 返回的光束被另一个光电探测器 (PD2) 检测, 恢复后的射频信号具有的相位延迟为 $\varphi_{\text{returned}} = \varphi_0 + 2\varphi_c + 2\varphi_p$ 。射频信号在相位检测器 (phase detector) 上与参考频率源进行相位比较, 以消除初始相位 φ_0 并生成包含信息 $2(\varphi_c + \varphi_p)$ 的误差信号 (error signal)。使用比例-积分伺服控制器 (PI), 误差信号被反馈到 ODL, 以补偿由水下湍流引起的相位波动 φ_p 。当伺服回路处于锁定状态时, 误差信号接近零, 即 $2(\varphi_c + \varphi_p) = 0$ 。在这种情况下, 可以将相位波动校正为 $\varphi_c = -\varphi_p$ 。即 ODL 产生的相移抵消了传输链路带来的相位波动。那么接收端所恢复射频信号的相位为 φ_0 , 从而实现稳定的频率传递。本实验中的 ODL 是由压电促动器 PZT (芯明天科技, VS12) 加全反镜构成, 其理论闭环带宽超过 10 kHz, 因此利用该 ODL 可以实现补偿快速的水流湍流。

本次水下激光频率传递实验的测试结果如图 8 所示。图 8(a) 为测得的定时抖动曲线, 其中曲线 (i) 表明在无相位补偿的情况下, 5000 s 内该 100 MHz 频率信号的 RMS 定时抖动为 7.3 ps。曲线 (ii) 表明, 采用光学相位补偿技术, RMS 定时抖动减小至大约 0.162 ps。此外, 我们还测量了实验装置的背景噪声,

即激光器的输出直接作用于 PD2 时的 RMS 定时抖动, 曲线 (iii) 显示实验装置的光路及电子线路背景噪声所形成的本底 RMS 定时抖动 0.07 ps。可见, 使用光学相位补偿后, 传输链路造成的定时抖动能被有效抑制, 且该技术比电学相位补偿技术更有效。

图 8(b) 为由定时抖动数据计算的阿伦方差, 其中曲线 (i) 显示在无相位补偿的情况下, 该频率传递系统的阿伦方差在 1 s 时为 2.5×10^{-12} , 在 1000 s 时达到 1×10^{-14} 。曲线 (ii) 显示经过光学相位补偿后, 该频率传递系统的阿伦方差降低到在 1 s 时为 2.8×10^{-13} , 在 1000 s 时为 2.7×10^{-16} 。这里, 曲线 (iii) 表示该频率传递系统本底噪声带来的频率不稳定性。可见, 相比于没有进行相位补偿时的频率稳定性, 采用光学相位补偿技术能将频率稳定性提升大约两个量级。相比于基于电学相位补偿的频率传递系统, 此频率传递系统本地噪声更小, 相位补偿带宽更宽, 这是频率稳定性能够进一步提升的主要原因。显然, 此水下频率传递系统达到的频率稳定性高于商用铯原子钟和氢原子钟。因此, 未来该频率传递方案有望被用于在水下时频网络中进行时钟信号分发^[51]。

5 多址频率传递技术

电学和光学相位补偿技术都可以用于定时抖动抑制。然而, 电学相位补偿技术存在固有噪声大、补偿带宽低、移相器的残余定时漂移等问题。光学相位补偿技术中的 ODL 基于机械结构, 导致 ODL 响应时间长, 使得补偿速度慢。且机械结构抗振能力弱, 容易将环境振动噪声耦合到传递的频率信号上。上述问题

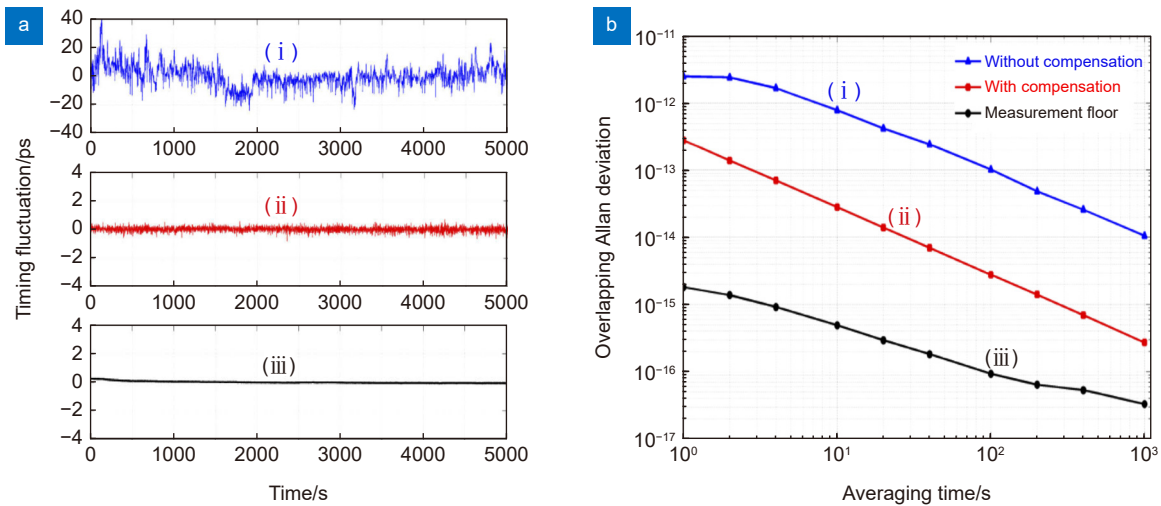


图 8 实验结果^[51]。(a) 定时抖动曲线: (i)-无补偿; (ii)-有补偿; (iii)-测量本底;
(b) 阿伦方差曲线: (i)-无补偿; (ii)-有补偿; (iii)-测量本底

Fig. 8 Experimental results^[51]. (a) Timing fluctuation curves: (i)-without compensation; (ii)-with compensation; (iii)-measurement floor;
(b) Allan deviation curves: (i)-without compensation; (ii)-with compensation; (iii)-measurement floor

限制了电学和光学相位补偿技术在需要快速补偿高频抖动的复杂情况下的应用。

可以发现上述两种水下频率传递方案均是相位补偿部分设计在发送端的, 这种设计在特殊情况下存在很大的局限性。比如, 为了将频率信号同时传递到多个接收端, 如分布式水下时频网络、传感网等, 需要在发送端为每一个接收端设计相同的相位补偿装置。在这种情况下, 成本、空间和效率都会成为限制系统性能的因素, 即此种系统设计难以用于多址频率分发。近年来, 多种多址频率分发技术在光纤和自由空间链路上均得到了实验验证^[52-55], 然而水下链路上的多址频率分发实验却鲜有报道。

为此, 课题组在 2021 年设计并验证了基于终端相位补偿技术的多址水下频率传递方案^[56], 相位补偿被设计在接收端, 支持点对多点频率传递。在 3 m 水下链路上传递了 100 MHz 射频信号, 利用终端相位补偿技术成功地将 5000 s 内的 RMS 定时抖动由 73.4 ps 降低至 3 ps。实验结果有力地证明了将终端相位补偿技术应用于水下激光频率传递的可行性较高。所设计的实验方案如图 9 所示, 发送端 (TX) 的频率源 (VCO A) 产生的 200 MHz 射频信号以幅度调制的方式加载到连续激光器 (laser A) 上, 此激光束经过水下链路传递到接收端 (RX1)。RX1 的频率源 (VCO B) 产生的 100 MHz 射频信号以幅度调制的方式调制到连续激光器 (laser B) 上, 此激光束经过水下链路传递

到 TX 后被反射镜沿原路反射回 RX1。在 RX1 处用锁相环将 VCO B 锁定到 VCO A 上, 即可实现稳定的射频信号传递。扩展的接收端 RX2~RX_n 的结构和原理均与 RX1 相同, 从而实现多址频率分发。

终端相位补偿原理描述如下。在 TX 处 VCO A 锁定在铷原子钟上, VCO A 产生的频率信号可以表示为

$$V_1 = \sin(2\pi f_1 t + \varphi_1), \quad (10)$$

式中: f_1 和 φ_1 分别表示 VCO A 所产生射频信号的频率和相位。 V_1 用于调制来自 Laser A 的光束幅度, 然后输出光被分光器分成几束相等的光束。对于这些光束之一, 它通过水下链路传播到 RX1。在 RX1, VCO B 用于调制 Laser B 的强度, 来自 VCO B 的信号可以表示为

$$V_2 = \sin(2\pi f_2 t + \varphi_2), \quad (11)$$

式中: f_2 和 φ_2 分别表示 VCO B 所产生射频信号的频率和相位。在依次通过半波片 ($\lambda/2$)、偏振分束器 (PBS) 和四分之一波片 ($\lambda/4$) 后, 调制光束传播到 TX 并由反射镜 (M1) 沿原路反射回来, 此光束两次通过同一水下链路。返回的光束由 PBS 与空间链路分离, 并由光电探测器 (PD1) 检测, 来自 PD1 的转换电信号由下式给出

$$V_3 = \sin(2\pi f_2 t + \varphi_2 + \varphi_p), \quad (12)$$

式中: φ_p 是由水下湍流引起的相位波动。同时, 来自 TX 的光束被另一个光电探测器 (PD2) 检测到, 转换

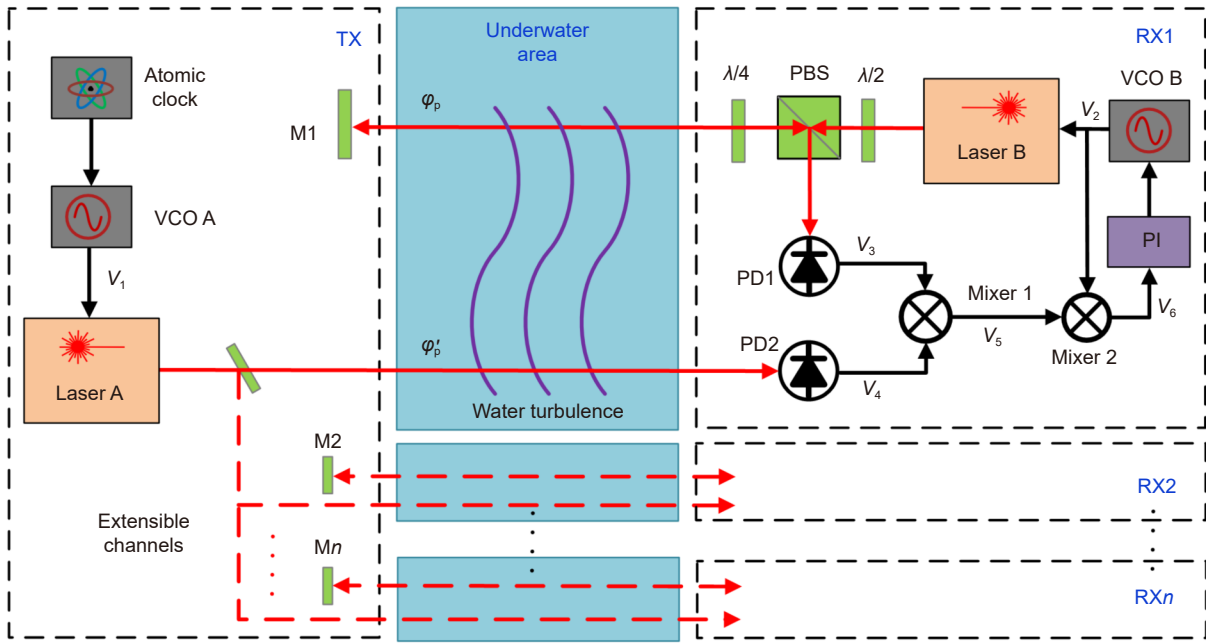


图 9 基于终端相位补偿技术的水下多址激光频率传递^[56]。TX: 发送端; RX: 接收端; VCO: 压控振荡器; λ/2: 半波片; PBS: 偏振分束器; λ/4: 四分之一波片; PD: 光电探测器; PI: 比例-积分控制器

Fig. 9 Laser-based multiple-access underwater frequency transfer based on terminal phase compensation technique^[56]. TX: transmitting site; RX: receiving site; VCO: voltage-controlled oscillator; M1: mirror 1; M2: mirror 2; Mn: mirror n; λ/2: half-wave plate; PBS: polarization beam splitter; λ/4: quarter-wave plate; PD: photodiode; PI: proportion-integration controller

后的电信号表示为

$$V_4 = \sin(2\pi f_1 t + \varphi_1 + \varphi'_p), \quad (13)$$

式中: φ'_p 是由相同水下湍流引起的相位波动。如果 $f_1 = 2f_2$, 那么 V_1 中单程水下链路引起的相位波动与 V_2 中双程水下链路引起的相位波动将是相等的, 即 $\varphi_p = \varphi'_p$ 。用混频器 (mixer 1) 将 V_3 与 V_4 进行混频, 其中频信号中的差频分量为

$$V_5 = \sin[2\pi(f_1 - f_2)t + \varphi_1 + \varphi'_p - \varphi_2 - \varphi_p]. \quad (14)$$

然后, V_5 与 V_2 用一个混频器 (mixer 2) 进行混频, 其中频信号中的差频分量为

$$V_6 = \sin[2\pi(f_1 - 2f_2)t + \varphi_1 + \varphi'_p - 2\varphi_2 - \varphi_p]. \quad (15)$$

由于有 $f_1 = 2f_2$, $\varphi_p = \varphi'_p$, 则 V_6 可表示为

$$V_6 = \sin(\varphi_1 - 2\varphi_2). \quad (16)$$

将 V_6 作为误差信号, 通过比例-积分控制器 (PI) 反馈控制 VCO B, 将 VCO B 的相位锁定到 VCO A, 即 $\varphi_2 = \varphi_1/2$ 。这样, VCO B 和 VCO A 均锁定到铷原子钟上, 从而实现稳定的频率传递。

本次水下激光频率传递实验的测试结果如图 10 所示。图 10(a) 为测得的定时抖动曲线, 其中曲线 (i) 表明在无相位补偿的情况下, 5000 s 内该 100 MHz 频率信号 RMS 定时抖动为 73.4 ps。曲线 (ii) 表明,

采用终端相位补偿技术, RMS 定时抖动减小至大约 3 ps。可见, 使用终端相位补偿后, 传输链路造成的定时抖动能被有效抑制, 且该技术比电学相位补偿技术更有效。图 10(b) 为由定时抖动数据计算的阿伦方差, 其中曲线 (i) 显示在无相位补偿的情况下, VCO B 与 VCO A 之间的相对频率不稳定性在 1 s 时为 8.5×10^{-12} , 在 1000 s 时达到 1×10^{-13} 。曲线 (ii) 显示经过相位补偿后, VCO B 与 VCO A 之间的相对频率不稳定性降低到在 1 s 时为 5.9×10^{-13} , 在 1000 s 时达到 5.3×10^{-15} 。可见, 采用终端相位补偿技术能将频率传递系统的稳定性提升大约两个量级。这里, 曲线 (iii) 表示在 RX1 处的 VCO B 在自由运转时 1000 s 内的频率稳定性变化情况, 在 1 s 时为 2.5×10^{-10} , 在 1000 s 时达到 2.2×10^{-9} 。可见对于自由运转的频率源, 其稳定性会持续降低, 难以用于高精度应用。采用终端相位补偿技术将 VCO B 锁相到 VCO A (参考频率) 上, 使得 VCO B 的频率稳定性趋于 VCO A 的频率稳定性, 等效实现高稳定度的频率传递。曲线 (iv) 表示商用铷原子钟 Microsemi-5071A 的频率稳定性, 低于频率传递系统的稳定性, 表明此系统具有传递铷原子钟信号的能力。

仅从频率稳定性看, 终端相位补偿技术的性能要

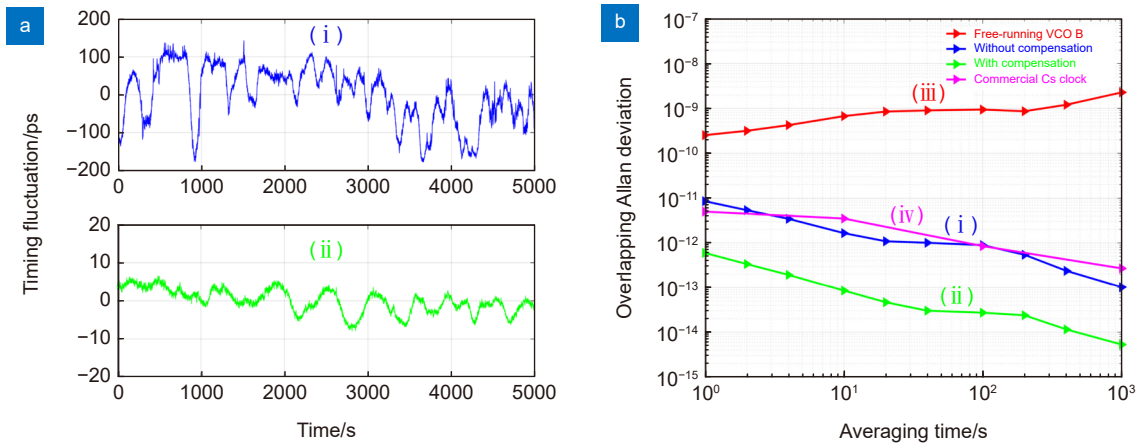


图 10 实验结果^[56]。(a) 定时抖动曲线: (i)-无补偿; (ii)-有补偿; (b) 阿伦方差曲线: (i)-自由运转的 VCO B; (ii)-无补偿; (iii)-有补偿; (iv)-商用铯原子钟 Microsemi-5071A

Fig. 10 Experimental results^[56]. (a) Timing fluctuation curves: (i)-without compensation; (ii)-with compensation; (b) Allan deviation curves: (i)-free running VCO B; (ii)-without compensation; (iii)-with compensation; (iv)-commercial Cs clock Microsemi-5071A

优于电学相位补偿技术, 低于光学相位补偿技术。这主要是由于此技术消除了电移相器带来的诸多问题, 实验中部分空间光路受到了强空气对流的扰动, 且水中的两条光路并未共线, 使得系统的固有不稳定度较高。但从效率、成本等方面考虑, 此方案仍不失为一种极具潜力的频率传递方案。此外, 在基于激光的频率传递系统中, 光源的强度噪声 (RIN) 是影响频率传输稳定度的一个重要因素, 在低噪声激光时间频率传输中可采用平衡探测的方式来对 RIN 噪声进行消除, 以提升频率传递的稳定度。例如文献 [21,24] 报道了在自由空间频率传递系统中采用了平衡探测技术来抑制激光 RIN 噪声, 最后实现了飞秒量级的时间同步结果。本论文报道的水下激光频率传递实验采用了 520 nm 的激光器, 与自由空间激光频率传递系统类似, 该激光器也存在一定程度的 RIN 噪声, 但是水下媒介对于频率信号噪声的贡献要远大于激光器本身, 从图 6 和图 8 可以看出, 在未补偿前的相位波动已经达到皮秒量级, 因此可以判断出相位波动的主要来源是水流湍流。同时, 由于我们实验的水下链路较短 (小于 10 m), 光束的准直所带来的光强噪声和波动较小, 因此 RIN 噪声对于补偿环路的影响在该本系统中可忽略。

6 总结和展望

源于水下无线光通信的成功实现, 水下激光频率传递技术将频率传递与分发从光纤链路和自由空间链路扩展到水下链路。相比于传统水下频率传递技术

(声纳、光缆等), 水下激光频率传递技术具有天然的优势。未来, 该技术有望推动水下时频网络的建立与实用化。本文介绍了电子科技大学在水下激光频率传递方面的最新研究进展。首先在时域和频域分别描述了水下传输链路的噪声特性, 时域描述基于水流速度和水体温度造成的折射率微扰引起的路径延迟抖动, 频域描述基于大气信道噪声功率谱密度的 Kolmogorov 模型及其修正模型—von Kármán 模型, 报道了课题组对频域描述的仿真和实验研究结果。

报道了基于电学相位补偿技术的水下激光频率传递实验。在此实验中, 在长度为 5 m 的水下链路上传递了 100 MHz 射频信号, 利用电学相位补偿技术成功地将 5000 s 内的 RMS 定时抖动由 9.6 ps 降低至 2.1 ps。分析了电学相位补偿技术存在的局限性, 报道了基于光学相位补偿技术的水下激光频率传递实验。在长度为 5 m 的水下链路上传递了 500 MHz 射频信号, 利用光学相位补偿技术成功地将 5000 s 内的 RMS 定时抖动由 7.3 ps 降低至 0.162 ps。实验结果表明光学相位补偿技术能有效提升补偿带宽, 降低系统本底噪声。分析对比了电学相位补偿技术和光学相位补偿技术的特点, 报道了基于终端相位补偿技术的水下多址激光频率传递实验。在长度为 3.5 m 的水下链路上传递了 100 MHz 射频信号, 利用光学相位补偿技术成功地将传递链路在 5000 s 内的 RMS 定时抖动由 73.4 ps 降低至 3 ps。实验结果表明此频率传递方案能将参考频率信号稳定的传递到接收端, 未来有望在水下时频网络中得到应用。

未来, 课题组拟进行远距离、高精度频率传递方法研究, 将使用大功率连续激光器并结合单光子探测技术等, 使得频率传递距离达百米量级, 且 RMS 定时抖动达到皮秒量级。进一步, 为了实现远距离更高的传递精度, 我们计划采用具有更高瞬时功率的飞秒绿光光梳作为光源。利用飞秒光梳脉冲能量高、脉冲窄的显著优点, 并采用光学相位比对法, 以实现飞秒量级的相位波动。但是, 水下色散系数相对大气环境要大很多, 且对其估算也相对复杂, 因此解决飞秒光梳在水下的色散补偿问题是实现远距离高精度传递的一项关键任务, 课题组将在这一领域持续开展研究。

参考文献

- [1] Kaushal H, Kaddoum G. Underwater optical wireless communication[J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 1518–1547.
- [2] Arnon S. Underwater optical wireless communication network[J]. *Opt Eng*, 2010, 49(1): 015001.
- [3] Johnson L J, Jasman F, Green R J, et al. Recent advances in underwater optical wireless communications[J]. *Underwater Technol*, 2014, 32(3): 167–175.
- [4] Kojima N, Yabuta T, Negishi Y, et al. Submarine optical fiber cable: development and laying results[J]. *Appl Opt*, 1982, 21(5): 815–821.
- [5] Nyman B. Flexibility in submarine fiber optic networks [Invited][J]. *J Opt Commun Networking*, 2015, 7(3): A553–A557.
- [6] Stojanovic M. Recent advances in high-speed underwater acoustic communications[J]. *IEEE J Ocean Eng*, 1996, 21(2): 125–136.
- [7] Stojanovic M, Preisig J. Underwater acoustic communication channels: propagation models and statistical characterization[J]. *IEEE Commun Mag*, 2009, 47(1): 84–89.
- [8] Al-Shamma 'a A I, Shaw A, Saman S. Propagation of electromagnetic waves at MHz frequencies through seawater[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2004, 52(11): 2843–2849.
- [9] Hale G M, Query M R. Optical constants of water in the 200-nm to 200- μm wavelength region[J]. *Appl Opt*, 1973, 12(3): 555–563.
- [10] Mullen L J, Vieira A J C, Herezfeld P R, et al. Application of RADAR technology to aerial LIDAR systems for enhancement of shallow underwater target detection[J]. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 1995, 43(9): 2370–2377.
- [11] Chi N, Wang C F, Li W P, et al. Research progress of underwater visible light communication technology based on blue/green LED[J]. *J Fudan Univ Nat Sci*, 2019, 58(5): 537–548. 迟楠, 王超凡, 李伟萍, 等. 基于蓝绿光LED的水下可见光通信技术研究进展[J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2019, 58(5): 537–548.
- [12] Hanson F, Radic S. High bandwidth underwater optical communication[J]. *Appl Opt*, 2008, 47(2): 277–283.
- [13] Cochenour B, Mullen L, Muth J. Modulated pulse laser with pseudorandom coding capabilities for underwater ranging, detection, and imaging[J]. *Appl Opt*, 2011, 50(33): 6168–6178.
- [14] Pellen F, Jezequel V, Zion G, et al. Detection of an underwater target through modulated lidar experiments at grazing incidence in a deep wave basin[J]. *Appl Opt*, 2012, 51(31): 7690–7700.
- [15] Cochenour B, Mullen L, Muth J. Temporal response of the underwater optical channel for high-bandwidth wireless laser communications[J]. *IEEE J Ocean Eng*, 2013, 38(4): 730–742.
- [16] Zhang Y F, Li X, Lv W C, et al. Link structure of underwater wireless optical communication and progress on performance optimization[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, 47(9): 190734. 张雨凡, 李鑫, 吕伟超, 等. 水下无线光通信链路构成与性能优化进展[J]. *光电工程*, 2020, 47(9): 190734.
- [17] Ma C B, Wang Y H, Ao J, et al. Research and implementation of underwater short-distance high-speed laser communication system[J]. *Opt Commun Technol*, 2016, 40(4): 52–55. 马春波, 王永辉, 敖珺, 等. 水下短距离高速激光通信系统的研究与实现[J]. *光通信技术*, 2016, 40(4): 52–55.
- [18] Liu J, Zhou Z, Peng Z, et al. Mobi-sync: efficient time synchronization for mobile underwater sensor networks[J]. *IEEE Trans Parallel Distrib Syst*, 2013, 24(2): 406–416.
- [19] Liu J, Wang Z H, Cui J H, et al. A joint time synchronization and localization design for mobile underwater sensor networks[J]. *IEEE Trans Mobile Comput*, 2016, 15(3): 530–543.
- [20] Sprenger B, Zhang J, Lu Z H, et al. Atmospheric transfer of optical and radio frequency clock signals[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(7): 965–967.
- [21] Giorgetta F R, Swann W C, Sinclair L C, et al. Optical two-way time and frequency transfer over free space[J]. *Nat Photonics*, 2013, 7(6): 434–438.
- [22] Chen S J, Sun F Y, Bai Q S, et al. Sub-picosecond timing fluctuation suppression in laser-based atmospheric transfer of microwave signal using electronic phase compensation[J]. *Opt Commun*, 2017, 401: 18–22.
- [23] Sun F Y, Hou D, Zhang D N, et al. Femtosecond-level timing fluctuation suppression in atmospheric frequency transfer with passive phase conjunction correction[J]. *Opt Express*, 2017, 25(18): 21312–21320.
- [24] Bergeron H, Sinclair L C, Swann W C, et al. Tight real-time synchronization of a microwave clock to an optical clock across a turbulent air path[J]. *Optica*, 2016, 3(4): 441–447.
- [25] Sinclair L C, Bergeron H, Swann W C, et al. Comparing optical oscillators across the air to milliradians in phase and 10^{-17} in frequency[J]. *Phys Rev Lett*, 2018, 120(5): 050801.
- [26] Caldwell E D, Swann W C, Ellis J L, et al. Optical timing jitter due to atmospheric turbulence: comparison of frequency comb measurements to predictions from micrometeorological sensors[J]. *Opt Express*, 2020, 28(18): 26661–26675.
- [27] Bodine M I, Ellis J L, Swann W C, et al. Optical time-frequency transfer across a free-space, three-node network[J]. *APL Photonics*, 2020, 5(7): 076113.
- [28] Dai H, Shen Q, Wang C Z, et al. Towards satellite-based quantum-secure time transfer[J]. *Nat Phys*, 2020, 16(8): 848–852.
- [29] Kang H J, Yang J, Chun B J, et al. Free-space transfer of comb-rooted optical frequencies over an 18 km open-air link[J]. *Nat Commun*, 2019, 10(1): 4438.
- [30] Dix-Matthews B P, Schediwy S W, Gozzard D R, et al. Point-to-point stabilized optical frequency transfer with active optics[J]. *Nat Commun*, 2021, 12(1): 515.
- [31] Gozzard D R, Howard L A, Dix-Matthews B P, et al. Ultrastable free-space laser links for a global network of optical atomic clocks[J]. *Phys Rev Lett*, 2022, 128(2): 020801.
- [32] Mullen L, Laux A, Cochenour B. Propagation of modulated light in water: implications for imaging and communications systems[J]. *Appl Opt*, 2009, 48(14): 2607–2612.

- [33] Mullen L, Alley D, Cochenour B. Investigation of the effect of scattering agent and scattering albedo on modulated light propagation in water[J]. *Appl Opt*, 2011, **50**(10): 1396–1404.
- [34] Cochenour B, Dunn K, Laux A, et al. Experimental measurements of the magnitude and phase response of high-frequency modulated light underwater[J]. *Appl Opt*, 2017, **56**(14): 4019–4024.
- [35] Lee R W, Laux A, Mullen L J. Hybrid technique for enhanced optical ranging in turbid water environments[J]. *Opt Eng*, 2013, **53**(5): 051404.
- [36] Luchinin A G, Kirillin M Y. Temporal and frequency characteristics of a narrow light beam in sea water[J]. *Appl Opt*, 2016, **55**(27): 7756–7762.
- [37] Nootz G, Matt S, Kanaev A, et al. Experimental and numerical study of underwater beam propagation in a Rayleigh-Bénard turbulence tank[J]. *Appl Opt*, 2017, **56**(22): 6065–6072.
- [38] Nakamura K, Mizukoshi I, Hanawa M. Optical wireless transmission of 405 nm, 1.45 Gbit/s optical IM/DD-OFDM signals through a 4.8 m underwater channel[J]. *Opt Express*, 2015, **23**(2): 1558–1566.
- [39] Xu J, Kong M W, Lin A B, et al. OFDM-based broadband underwater wireless optical communication system using a compact blue LED[J]. *Opt Commun*, 2016, **369**: 100–105.
- [40] Liu X Y, Yi S Y, Zhou X L, et al. 34.5 m underwater optical wireless communication with 2.70 Gbps data rate based on a green laser diode with NRZ-OOK modulation[J]. *Opt Express*, 2017, **25**(22): 27937–27947.
- [41] Liu X Y, Yi S Y, Zhou X L, et al. Laser-based white-light source for high-speed underwater wireless optical communication and high-efficiency underwater solid-state lighting[J]. *Opt Express*, 2018, **26**(15): 19259–19274.
- [42] Nootz G, Jarosz E, Dalglish F R, et al. Quantification of optical turbulence in the ocean and its effects on beam propagation[J]. *Appl Opt*, 2016, **55**(31): 8813–8820.
- [43] Yu X P, Hu Y A, Liu L, et al. Propagation characteristics of underwater laser based on multiple scattering and small scattering angles approximation[J]. *Acta Photonica Sin*, 2015, **44**(11): 1101002.
- 俞雪平, 胡云安, 刘亮, 等. 基于多次散射和小散射角近似的水下激光传播特性[J]. *光子学报*, 2015, **44**(11): 1101002.
- [44] Liu W H, Xu Z Y, Yang L Q. SIMO detection schemes for underwater optical wireless communication under turbulence[J]. *Photonics Res*, 2015, **3**(3): 48–53.
- [45] Sinclair L C, Giorgetta F R, Swann W C, et al. Optical phase noise from atmospheric fluctuations and its impact on optical time-frequency transfer[J]. *Phys Rev A*, 2014, **89**(2): 023805.
- [46] Fante R L. Electromagnetic beam propagation in turbulent media[J]. *Proc IEEE*, 1975, **63**(12): 1669–1692.
- [47] Harvey A H, Gallagher J S, Sengers J M H L. Revised formulation for the refractive index of water and steam as a function of wavelength, temperature and density[J]. *J Phys Chem Ref Data*, 1998, **27**(4): 761–774.
- [48] Quan X H, Fry E S. Empirical equation for the index of refraction of seawater[J]. *Appl Opt*, 1995, **34**(18): 3477–3480.
- [49] Hou D, Chen J Y, Guo G K. Analysis and experimental demonstration of underwater frequency transfer with diode green laser[J]. *Rev Sci Instrum*, 2020, **91**(7): 075102.
- [50] Hou D, Bai Q S, Guo G K, et al. Highly-stable laser-based underwater radio-frequency transfer with electronic phase compensation[J]. *Opt Commun*, 2019, **452**: 247–251.
- [51] Hou D. Laser-based underwater frequency transfer with sub-picosecond timing fluctuation using optical phase compensation[J]. *Opt Express*, 2020, **28**(22): 33298–33306.
- [52] Hou D, Zhang D N, Sun F Y, et al. Free-space-based multiple-access frequency dissemination with optical frequency comb[J]. *Opt Express*, 2018, **26**(15): 19199–19205.
- [53] Wang B, Zhu X, Gao C, et al. Square kilometre array telescope—precision reference frequency synchronisation via 1f-2f dissemination[J]. *Sci Rep*, 2015, **5**(1): 13851.
- [54] Grosche G. Eavesdropping time and frequency: phase noise cancellation along a time-varying path, such as an optical fiber[J]. *Opt Lett*, 2014, **39**(9): 2545–2548.
- [55] Bai Y, Wang B, Zhu X, et al. Fiber-based multiple-access optical frequency dissemination[J]. *Opt Lett*, 2013, **38**(17): 3333–3335.
- [56] Ren J W, Hou D, Gao Y F, et al. Highly stable multiple-access underwater frequency transfer with terminal phase compensation[J]. *Opt Lett*, 2021, **46**(19): 4745–4748.

作者简介



【通信作者】侯冬(1982-), 男, 博士, 副研究员, 北京大学电路与系统专业博士毕业, 曾在美国科罗拉多大学博尔分校以及韩国高等科学技术研究院从事博士后工作, 目前主要从事光纤、自由空间, 以及水下时间频率信号传递和超稳飞秒激光方面研究。

E-mail: houdong@uestc.edu.cn



任军委(1997-), 男, 硕士, 主要从事时间频率传递与同步方面的研究, 目前在上海交通大学攻读博士学位。

E-mail: 201921060731@std.uestc.edu.cn



郭广坤(1982-), 男, 博士, 助理研究员, 电子科技大学测试技术与仪器专业博士毕业, 目前与主要从事高精度信号产生技术与时频传递方面的研究。

E-mail: guo Guangkun@uestc.edu.cn

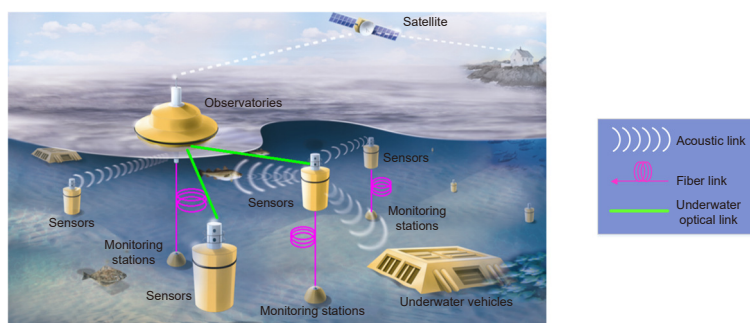


刘科(1978-), 男, 博士, 研究员, 电子科技大学测试技术与仪器专业博士毕业, 目前主要从事高精度任意波形产生技术与精密信号测量方面的研究。

E-mail: liuke@uestc.edu.cn

Progress on high-precision laser-based underwater frequency transfer

Hou Dong^{*}, Ren Junwei, Guo Guangkun, Liu Ke



Underwater time-frequency networks

Overview: Abundant resources in the ocean are not explored yet. The meaning of ocean exploration is far-reaching for the development of human society. In the future, the construction of underwater observation networks with outstanding performance is the precondition of a variety of scientific experiments, and time-frequency networks like GPS are helpful for the collaborative working of underwater platforms. The success of underwater wireless optical communication expands the dissemination of time-frequency signals over free-space and fiber links to underwater links. Compared with the conventional underwater frequency transfer methods, i.e. sonar, fiber links, and microwave method, the laser-based underwater frequency transfer owns strong competitiveness with the features of high flexibility, high bandwidth, and low latency. Such advantages make the laser-based underwater frequency transfer a promising approach for the construction of future underwater time-frequency networks. The paper introduces the progress on laser-based underwater frequency transfer at the University of Electronic Science and Technology of China, including the property analysis of underwater links, three specific techniques, and the future works that would be conducted. The property analysis of underwater links was conducted from the timing fluctuation attributed to refractive-index perturbation and underwater turbulence introduced power spectral density (PSD) that derived from the Kolmogorov model. The simulation results of Kolmogorov PSD and its modified PSD (von Kármán model) are given and analyzed. Based on the analysis, the experimental demonstrations of frequency transfer over 3 m, 6 m, and 9 m underwater links were conducted. The experimental results show that timing fluctuation is most partly attributed to underwater turbulence. It is necessary for highly stable frequency transfer to suppress timing fluctuation. An electronic phase compensation technique was employed for timing fluctuation suppression. A 100 MHz radio-frequency (RF) signal has been transferred over a 5 m underwater link using this technique. With the help of this technique, the root-mean-square (RMS) timing fluctuation was successfully suppressed from 9.6 ps to 2.1 ps within 5000 s. The noise, limited compensation bandwidth, and residual timing fluctuations of the electronic phase shifters block further improvement of system performance. Consequently, the optical delay line-based optical phase compensation technique was proposed and experimentally demonstrated. A 500 MHz RF signal was transferred over a 5 m underwater link for 5000 s, the RMS timing fluctuation was successfully suppressed from 7.3 ps to 0.162 ps. The experimental results show that the proposed technique could effectively suppress timing fluctuation and lower the system noise floor. Both phase compensation techniques are hard to support multiple-access frequency transfer because compensation configuration is included in the transmitter. A novel scheme for multiple-access frequency transfer was proposed and experimentally demonstrated. A 100 MHz RF signal was transferred over a 3 m underwater link for 5000 s, the RMS timing fluctuation was successfully suppressed from 73.4 ps to 3 ps. With this scheme, the phase of the frequency signal at multiple receivers could be simultaneously locked to the phase of the reference signal at the transmitter. In the future, the optical link of the multiple-access frequency transfer experimental setup would be optimized for further performance improvement. Laser-based underwater frequency transfer experiments with picosecond-level timing fluctuations over hundred meters links would be demonstrated with the help of the single-photon detection technique and a picosecond mode-locked laser at 1064 nm wavelength.

Hou D, Ren J W, Guo G K, et al. Progress on high-precision laser-based underwater frequency transfer[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(2): 220149; DOI: [10.12086/oe.2023.220149](https://doi.org/10.12086/oe.2023.220149)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61871084, 62271109), Applied Basic Research Program of Sichuan Province (2019YJ0200), and Equipment Advance Research Field Foundation (315067206, 315067207), China.

School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China

* E-mail: houdong@uestc.edu.cn