

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2026.01.04

基于本振光增强的双混频时差微弱频率信号检测方法

张运睿, 高昊, 罗斌*, 喻松

(北京邮电大学 信息光子学与光通信全国重点实验室, 北京 100876)

摘要: 在超长跨距光纤频率传递过程中, 功率衰减、有源器件带附加噪声等因素导致接收端频率信号微弱, 限制了信号检测分辨率和灵敏度。针对该问题, 本研究团队提出基于本振光增强的双混频时差微弱频率信号检测方法, 通过相干激光器增强微弱载波信号功率, 采用双混频时差检测结构以提升接收灵敏度, 同时结合平衡探测技术实现高信噪比信号提取。实验结果表明: 与传统的强度调制/直接探测方式相比, 基于本振光增强的双混频时差微弱频率信号检测方法可有效提升接收端灵敏度约 10 dB, 在相同的入光功率条件下射频功率提升了 25 dB; 该方法实现了优异的频率稳定度, 阿伦方差为 $2 \times 10^{-13}@1 \text{ s}$ 及 $2.1 \times 10^{-15}@10 \text{ 000 s}$, 在差频为 10 kHz 的条件下稳定度为 $3 \times 10^{-17}@1 \text{ s}$ 和 $3 \times 10^{-19}@10 \text{ 000 s}$, 验证了其在高精度光纤频率传递中的可行性与显著优势。

关键词: 本振光增强; 双混频时差法; 微弱信号; 接收灵敏度; 频率稳定度; 频率传递; 平衡探测技术; 量子通信

中图分类号: TB9; O43

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2026) 01-0055-08

Dual-mixing time-delay detection of weak frequency signals enabled by local-oscillator optical enhancement

ZHANG Yunrui, GAO Hao, LUO Bin*, YU song

(State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: In the process of ultra long span fiber frequency transmission, factors such as power attenuation and additional noise of active devices lead to weak frequency signal at the receiving end, which limits the signal detection resolution and sensitivity. To solve this problem, the research team proposed a dual-mixing time-delay detection of weak frequency signals enabled by local-oscillator optical enhancement. The weak carrier signal power was enhanced by a coherent laser, and the dual-mixing time-delay detection structure was used to improve the receiving sensitivity. At the same time, the high signal-to-noise ratio signal extraction was realized by combining with the balanced detection technology. The experimental results show that compared with the traditional intensity modulation / direct detection method, the dual-mixing time-delay detection of weak frequency signals enabled by local-oscillator optical enhancement can effectively im-

收稿日期: 2025-11-26; 修回日期: 2026-01-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(62501076); 时空信息精密感知技术全国重点实验室开放基金项目(STSL2025-B-09-01(T))

引用格式: 张运睿, 高昊, 罗斌, 等. 基于本振光增强的双混频时差微弱频率信号检测方法[J]. 计测技术, 2026, 46(1): 55-62.

Citation: ZHANG Y R, GAO H, LUO B, et al. Dual-mixing time-delay detection of weak frequency signals enabled by local-oscillator optical enhancement [J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(1): 55-62.



prove the sensitivity of the receiver by about 10 dB, the RF power is increased by 25 dB under the same input power condition, and this method achieves excellent frequency stability, with Allen deviation of 2×10^{-13} @1 s and 2.1×10^{-15} @10 000 s, and stability of 3×10^{-17} @1 s and 3×10^{-19} @10 000 s under the condition of difference frequency of 10 kHz, which verifies the feasibility and significant advantages of the proposed method in high-precision optical fiber frequency transmission.

Key words: local oscillator optical enhancement; dual-mixing time-delay detection; weak signal; receiver sensitivity; frequency stability; frequency transfer; balanced detection technology; quantum communication

0 引言

随着时间频率技术的快速发展,高稳定度的射频信号检测与频率传递在精密测量、量子通信及光频标准比对等领域中发挥着越来越重要的作用。在现代光纤时频传递体系中,射频系统作为连接光学频率基准与电学测量链路的关键接口,承担着频率调制、信号载送与稳定度表征等核心功能,其性能直接决定远距离时间频率同步的准确性与可靠性。微弱射频信号位于射频系统中链路接收端的最前沿测量环节,其幅度直接受光纤衰减与链路噪声限制,是整个系统频率提取、稳定度评估及后续锁定控制的关键输入,其信噪比水平决定了时频传递精度的上限。一般的光纤射频传输系统多采用强度调制/直接探测方式,接收端信号易受链路衰减、激光强度噪声、散粒噪声和色散效应等影响而显著退化,导致系统的信噪比低,频率提取精度与长期稳定度受限。尤其是进行长距离传输时,上述问题会更加显著,若直接通过光电探测器进行检测,将导致过量噪声占主导^[1-4]。有研究指出,进行250 km链路传输时总光损耗达73 dB,会导致接收信号稳定度急剧恶化^[5]。

接收灵敏度作为衡量系统对微弱信号探测能力的核心指标,直接反映接收端可靠检测的最小信号功率,是评估传递系统的关键参数。为增强链路衰减、低信噪比条件下系统的接收灵敏度,增强微弱信号探测能力,相关技术已受到研究人员重点关注,其中本振光增强技术最具代表性^[6],该技术在长距离、强衰减链路中展现出显著的灵敏度提升能力^[7]。近年来,研究人员不断完善该技术,实现了更低噪声的本振体系、更高带宽的相干接收以及更高稳定度的相位恢复算法等^[8-9],

进一步巩固了本振光增强技术在微弱信号检测中的先进性与实用性。本振光增强所带来的灵敏度提升,能够直接弥补长链路中微弱射频-光信号的功率衰减问题,为实现长距离高精度光纤频率传递提供了关键支撑。

在微弱频率信号稳定度检测方面,传统的直接测频或拍频方法往往受到测量带宽、采样分辨率及系统噪声的限制^[10-20],难以在高噪声背景下准确表征信号的稳定性^[21-22]。为提升检测微小频率波动的灵敏度,研究人员提出了双混频时差法^[23]。该方法引入公共频率源,虽然在混频过程中会叠加来自该频率源的相位噪声,但两路差频信号均包含相同的公共噪声,通过相减可消除其共模部分,因此并不会降低系统最终的频率稳定度,为实现微弱信号的高精度测量提供了重要技术支撑。

针对超长跨距光纤频率传递过程中,功率衰减、有源器件带附加噪声等因素导致接收端频率信号微弱,进而影响检测分辨率和灵敏度的问题,本文提出基于本振光增强的双混频时差微弱频率信号检测方法,引入高功率本振光对接收信号进行光学放大,采用双混频时差检测体系提升接收灵敏度,并在接收端采用包络检波方法恢复原始信号,提高接收端的信噪比与解调精度。

1 基于本振光增强的高灵敏度检测

包络检波相干检测如图1所示。激光器波长设置为1 550.12 nm,分束器将光源分为两路,一路经马赫-曾德尔调制器(Mach-Zehnder Modulator, MZM)调制10 MHz射频信号,作为信号光;另一路经声光调制器(Acousto-Optical Modulators, AOM)偏移80 MHz,生成与前一路具有频率差的本振光,如式(1)所示^[9]。

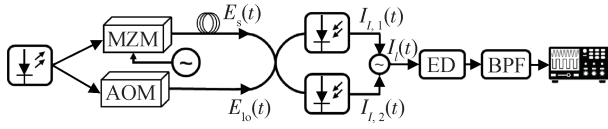


图1 包络检波相干检测示意图

Fig.1 Schematic diagram of coherent detection using envelope detection

$$\begin{cases} E_s(t) = \sqrt{P_s} \cdot e^{j(\omega_s t + \varphi_s)} \cdot a(t) \cdot e^{j\varphi(t)} \cdot e^{j\varphi_{ns}(t)} \cdot e_s \\ E_{lo}(t) = \sqrt{P_{lo}} \cdot e^{j(\omega_{lo} t + \varphi_{lo})} \cdot e^{j\varphi_{nl0}(t)} \cdot e_{lo} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $E_s(t)$ 为信号光， $E_{lo}(t)$ 为本振光， P_s 和 P_{lo} 分别为信号光与本振光的功率， j 为虚数符号， t 为时间， ω_s 、 ω_{lo} 分别为信号光本振光的初始频率， φ_s 、 φ_{lo} 分别为信号光和本振光的初始相位， $a(t)$ 为信号

$$\begin{cases} I_{L,1}(t) = \frac{1}{2} R [E_s(t) + jE_{lo}(t)] [E_s(t) + jE_{lo}(t)]^* + i_{sh1} = \frac{1}{2} RP_s \cdot a^2(t) + \frac{1}{2} RP_{lo} + \\ \quad i_{sh1} + R\sqrt{P_s P_{lo}} \cdot a(t) e_s e_{lo} \cdot \sin[\Delta\omega t + \varphi_n(t) + \varphi_0 + \varphi(t)] \\ I_{L,2}(t) = \frac{1}{2} R [jE_s(t) + E_{lo}(t)] [jE_s(t) + E_{lo}(t)]^* + i_{sh2} = \frac{1}{2} RP_s \cdot a^2(t) + \frac{1}{2} RP_{lo} + \\ \quad i_{sh2} - R\sqrt{P_s P_{lo}} \cdot a(t) e_s e_{lo} \cdot \sin[\Delta\omega t + \varphi_n(t) + \varphi_0 + \varphi(t)] \end{cases} \quad (2)$$

式中： R 为平衡光电探测器的响应度， i_{sh1} 和 i_{sh2} 分别为两路信号的噪声分量， $\Delta\omega$ 为信号光与本振光之间的频差， $\varphi_n(t)$ 为信号光引入的相位噪声与本振光引入的相位噪声之差， φ_0 为信号光与本振光初始相位的差。

经过平衡光电探测器输出的信号可表示为^[9]

$$I_l(t) = I_{L,1}(t) - I_{L,2}(t) = 2R\sqrt{P_s P_{lo}} \cdot a(t) e_s e_{lo} \cdot \sin[\Delta\omega t + \varphi_n(t) + \varphi_0 + \varphi(t)] + i_{sh} \quad (3)$$

式中： i_{sh} 为平衡探测器中 2 个光电探测器进行拍频后引入的噪声之差。

各物理量满足如下关系^[9]

$$\begin{cases} \Delta\omega = \omega_s - \omega_{lo} \\ \varphi_n(t) = \varphi_{ns}(t) - \varphi_{nl0}(t) \\ \varphi_0 = \varphi_s - \varphi_{lo} \end{cases} \quad (4)$$

由式(3)可知，提高本振光功率有助于提升接收端的灵敏度。此外，由于射频信号调制在光载波上，且本振光与信号光存在 80 MHz 的频率差，经过平衡光电探测器输出的信号为叠加在 80 MHz 载波上的 10 MHz 信号。经过包络检波(Envelope Detection, ED)处理(一种基于非线性整流与低通滤波的简单信号解调方法)和带通滤波器(Band Pass Filter, BPF)，即可恢复出 10 MHz 的射频信号。

光随时间变化的幅度， $\varphi_{ns}(t)$ 为信号光引入的相位噪声(包括马赫-曾德尔调制器的调制噪声、信号激光器本征相位噪声等)项， $\varphi_{nl0}(t)$ 为本振光引入的相位噪声(包括本振激光器的线宽与频率漂移噪声、本地光路的环境扰动噪声等)项， $\varphi(t)$ 为射频信号经光纤链路传输后所携带的附加相位， e_s 、 e_{lo} 分别为信号光与本振光的偏振方向。

在接收端，来自 3 dB 耦合器的两路输出接入平衡光电探测器，经拍频检测后得到两路相位差为 π 的信号，该相位差并非由额外移相器引入，而是由 3 dB 光耦合器内部的固定相位响应决定，分光过程使两路输出中的拍频项呈反相分布。探测器得到的两路拍频信号 $I_{L,1}(t)$ 、 $I_{L,2}(t)$ 如式(2)所示^[9]。

对射频信号进行希尔伯特变换，将其转换为解析信号，如式(5)所示。

$$z(t) = I_l(t) + j\hat{I}_l(t) \quad (5)$$

式中： $z(t)$ 为解析信号， $\hat{I}_l(t)$ 为 $I_l(t)$ 的希尔伯特变换。从解析信号中获得复包络，其模值即为所需的包络，公式为

$$a(t) \propto |z(t)e^{-j\Delta\omega t}| \quad (6)$$

去除载波的高频分量，包络检波能够恢复幅度调制信号的包络，并提取出原始信息信号。在实验中，使用 ADL5511 型射频包络检波器模块实现对包络信号的提取，该方法具有成本低、实现简单的优点。

使用线宽小于 2 kHz 的单频光纤激光器进行实验，信号光与本振光由同一窄线宽激光器分束获得，以保证良好的相干条件。实验结果如图 2 所示，其中，灰色曲线为使用 2.4 G 平衡光电探测器中的某一端口进行实验的结果；蓝色曲线为基于度调制/直接探测的方式，使用 2.4 G 带宽的光电探测器进行拍频所得到的结果，可以看出：在输入光功率为 -39 dBm 的情况下，信号能够被有效检测；红色曲线为基于本振光增强的方式，使用

2.4 G带宽的平衡光电探测器进行实验的结果，可以看出：在输入光功率为-49 dBm时，信号仍能够有效检测。本文提出的方法能够有效抑制共模噪声，相较直接探测方法接收灵敏度提升了10 dB；在相同入光功率下，射频功率提升约25 dB。

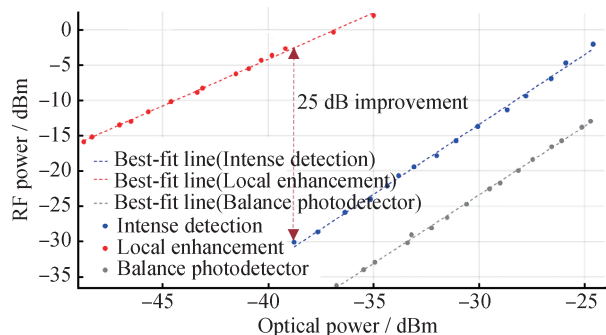


图2 本振光增强、强度调制/直接探测使用光电探测器及雪崩光电探测器方案对比图

Fig.2 Comparison diagram of local oscillator optical enhancement and intensity modulation / direct detection using PD and APD schemes

2 基于双混频时差法的高灵敏度稳定度检测

2.1 基于双混频时差法的检测程序设计

在弱信号频率稳定度检测研究中，双混频时差法凭借其对高噪声环境下微小频率变化的高灵敏度识别能力，已成为近年来颇具发展潜力的重要技术之一。该方法通过两级混频结构，将被测信号与参考本振信号的频率与相位信息逐级下变频，从而有效降低后端采集与处理所需的带宽，并将微弱的相位起伏转化为易于测量的时间差形式。相较传统直接测频/拍频方法，双混频时差法能够显著抑制系统噪声影响，实现对超弱、高稳定度信号频率特性的精确捕获，是精密时间频率计量领域的重要检测手段。

在频率稳定度检测方面，传统的直接频率比对/拍频法受带宽及系统噪声的影响，难以准确表征信号的稳定性^[10-14]。针对该问题，本文设计了一种基于LabVIEW的双混频时差法频率稳定度检测系统，该系统对待测信号 $f_a(t)$ 与公共频率源 $f_0(t)$ 的差频 $f_1(t)$ 、频标信号 $f_r(t)$ 与公共频率源的差频 $f_2(t)$ 这两路差频信号的频率差值进行计算，实现了高分辨率、高灵敏度的频率稳定度评估。

在双混频时差法中，需要对两路混频信号的时域波形进行数字提取，以获得瞬时相位差。相位估计和阿伦方差计算均依赖长时间、高分辨率的采样数据，因此系统需要使用高速采集卡对信号进行同步采样。采集卡可提供统一时钟下的多通道同步采样能力，并支持长时间连续采样，从而保证时差检测的准确性与频率稳定度计算的可靠性。设计的实验流程如图3所示。

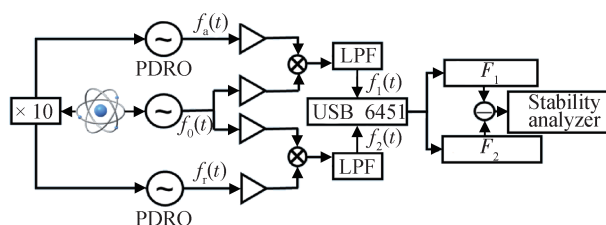


图3 双混频时差法实验流程图

Fig.3 Test flowchart of dual-frequency mixing time-delay method

系统以同一高稳定频率基准为源，经倍频($\times 10$)后同时驱动被测信号与频标信号。保证被测信号 $f_a(t)$ 、频标信号 $f_r(t)$ 和公共频率源 $f_0(t)$ 三路信号在同一频率基准下具有良好的相关性，如式(7)所示。

$$\begin{cases} f_a(t) = E_a \sin [2\pi\nu_0 t + \varphi_a(t)] \\ f_0(t) = E_0 \sin [2\pi(\nu_0 - \nu_b)t + \varphi_0(t)] \\ f_r(t) = E_r \sin [2\pi\nu_0 t + \varphi_r(t)] \end{cases} \quad (7)$$

式中： E_a 、 E_0 、 E_r 分别为信号 $f_a(t)$ 、 $f_r(t)$ 、 $f_0(t)$ 的幅值， ν_0 为待测信号的初始频率， ν_b 为下变频后差频信号的频率， $\varphi_a(t)$ 、 $\varphi_0(t)$ 、 $\varphi_r(t)$ 分别为信号 $f_a(t)$ 、 $f_r(t)$ 、 $f_0(t)$ 的初始相位。

由锁相介质振荡器(Phase-locked Dielectric Resonator Oscillator, PDRO)得到上、下两路信号，经放大后，与公共频率源进行混频，生成两路信号。混频后的信号经低通滤波器(Low-Pass Filter, LPF)滤除高频分量，仅保留所需的差频成分 $f_1(t)$ 与 $f_2(t)$ ，有效降低后端采集系统的带宽需求，如式(8)所示。

$$\begin{cases} f_1(t) = E_1 \sin [2\pi\nu_b t + \varphi_a(t) - \varphi_0(t)] \\ f_2(t) = E_2 \sin [2\pi\nu_b t + \varphi_r(t) - \varphi_0(t)] \end{cases} \quad (8)$$

式中： E_1 、 E_2 分别为信号 $f_1(t)$ 、 $f_2(t)$ 的幅值。

瞬时时间偏差 $x(t)$ 为^[15]

$$x(t) = \frac{\varphi(t)}{2\pi\nu} \quad (9)$$

式中： ν 为信号频率， $\varphi(t)$ 为信号相位。

可得

$$\begin{cases} x_{a,r}(t) = \frac{\varphi_a(t) - \varphi_r(t)}{2\pi\nu_0} \\ x_{1,2}(t) = \frac{[\varphi_a(t) - \varphi_0(t)] - [\varphi_r(t) - \varphi_0(t)]}{2\pi\nu_b} \end{cases} \quad (10)$$

式中： $x_{a,r}(t)$ 为待测频率信号与参考频率信号之间的时间偏差， $x_{1,2}(t)$ 为两路差频信号之间的时间偏差。

分数频率偏差 $y(t)$ 为^[15]

$$y(t) = \frac{dx(t)}{dt} \quad (11)$$

计算得到

$$\begin{cases} y_{a,r}(t) = \frac{d[\varphi_a(t) - \varphi_r(t)]}{2\pi\nu_0 \cdot dt} \\ y_{1,2}(t) = \frac{d\{[\varphi_a(t) - \varphi_0(t)] - [\varphi_r(t) - \varphi_0(t)]\}}{2\pi\nu_b \cdot dt} \end{cases} \quad (12)$$

式中： $y_{a,r}(t)$ 为 $f_a(t)$ 与 $f_r(t)$ 之间的分数频率偏差， $y_{1,2}(t)$ 为双混频时差法经过低通滤波器后两信号的分数频率偏差。

推导可得

$$y_{1,2}(t) = y_{a,r}(t) \cdot \frac{\nu_0}{\nu_b} \quad (13)$$

令 $k = \nu_0 / \nu_b$ （即双混频时差法的差拍系数）。可见本文提出的方法将频率信号的测量精度提高了 k 倍。

两路差频信号 $f_1(t)$ 与 $f_2(t)$ 被同步送入数据采集卡中进行多通道同步采样。采集过程中，系统在统一时钟条件下对两路信号进行长时间连续采样，以保证相位与时间信息提取的准确性。在数据处理阶段，对采集到的两路差频信号分别进行频率估计，通过LabVIEW使用过零点检测法得到频率 F_1 和 F_2 ，如式(14)所示。

$$\begin{cases} F_1 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d[\varphi_a(t) - \varphi_0(t)]}{dt} \\ F_2 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d[\varphi_r(t) - \varphi_0(t)]}{dt} \end{cases} \quad (14)$$

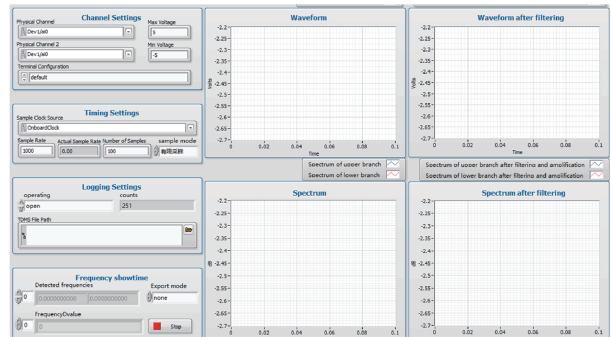
对两路频率结果作差，消除公共参考源的共模噪声影响，从而获得反映被测信号相对频率波动的时差序列。进一步计算得到

$$y_{1,2}(t) = \frac{1}{\nu_b} (F_1 - F_2) \quad (15)$$

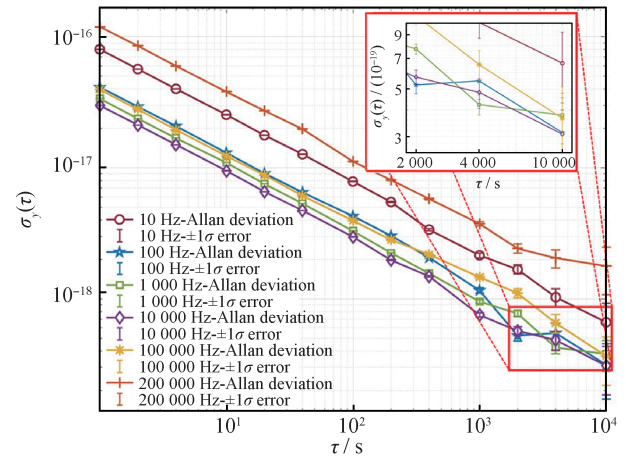
将得到的时差或频差数据输入稳定度分析模

块，计算阿伦方差，以定量表征被测信号的短期及中长期频率稳定度。

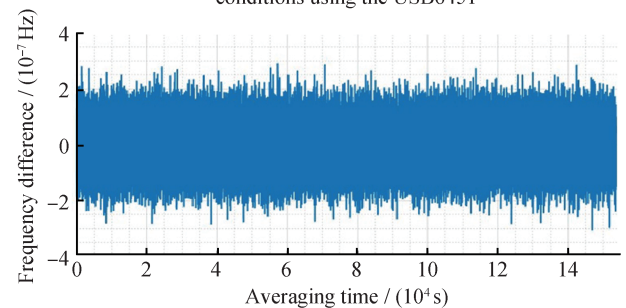
根据实验室现有器件，选择采样率为1 MHz、分辨率为20位的USB 6451对差频信号进行采集，同时在接收端设计了基于LabVIEW的频率实验应用程序，如图4(a)所示。对USB 6451的使用端口、接收信号的最大和最小值、终端配置、时钟配置、采样率、采样点数、采样模式、实际采样率显示、



(a) LabVIEW应用程序设计界面
(a) LabVIEW application design interface



(b) 使用USB6451在不同差频条件下的稳定度对比
(b) Comparison of stability under different difference frequency conditions using the USB6451



(c) USB6451在实验10 kHz差频时的频率分布
(c) Frequency distribution of USB6451 during testing of difference frequency at 10 kHz

图4 双混频时差法实验

Fig.4 Experiment of the dual mixing time-delay method

根据过零点检测得到的两支路频率值及频率差值的实时显示、上下两差频信号的时域频域波形图及数字滤波后的时域频域波形图等进行设置,并使用不同的差频信号进行实验,如图4(b)所示,其中, τ 为取样时间, $\sigma_y(\tau)$ 为阿伦方差。可以看出:在双混频时差法实验中,不同差频点对应的稳定度表现并不一致,这是由系统噪声的频率分布特性(即噪声谱密度)决定的。混频器、放大器的噪声在低频区域通常受到 $1/f$ 噪声主导,当差频设置过低(例如 10 Hz 或 100 Hz)时,测量信号正好落入该高噪声区,使得相位测量受到显著干扰,导致稳定度降低。当差频设置过高(例如 100 kHz 或 200 kHz)时,受采集卡采样率的限制,量化噪声将增大。

如图4(b)及表1所示,当差频约为 10 kHz 时,系统获得了最优的稳定度表现,因此在本振光增强实验中,采用 10 kHz 差频对信号继续进行稳定度检测。图4(c)是由双混频时差法得到的两路 10 kHz 差频信号频率差值的变化曲线,可见该方法实现了对信号微赫兹级的频率分辨率。

表1 使用USB6451在不同差频条件下的稳定度

Tab.1 Stability of USB6451 under different beat frequency conditions

差频/Hz	稳定度		
	1 s	100 s	10 000 s
10	8.0×10^{-17}	7.9×10^{-18}	6.6×10^{-19}
10^2	4.1×10^{-17}	4.3×10^{-18}	3.1×10^{-19}
10^3	3.4×10^{-17}	3.3×10^{-18}	3.8×10^{-19}
10^4	3.0×10^{-17}	3.0×10^{-18}	3.1×10^{-19}
10^5	4.0×10^{-17}	4.0×10^{-18}	3.7×10^{-19}
2×10^5	1.2×10^{-16}	1.1×10^{-17}	1.8×10^{-18}

2.2 使用双混频时差法对微弱信号进行稳定度实验

为进一步验证本振光增强系统在微弱信号探测中的有效性,采用双混频时差法对系统输出信号的频率稳定度进行测量。实验过程中,首先通过引入高功率本振光对接收端的微弱射频-光信号进行增强,显著提高信号幅度,使原本接近噪声底的射频信号得以有效解调(即光学放大过程)。

这一步骤有效改善了低信噪比条件下信号的可测性,为后续频率稳定度测量提供了可靠的输入。

增强后的信号与原子频标分别和公共频率源进行混频,形成两路差频信号。通过LabVIEW程序实时采集两路差频数据,并计算其频差序列,可获得精确的时间序列信息。进一步对该频差序列进行阿伦方差分析计算,表征系统在不同积分时间下的频率稳定度。图5(a)为本振光增强系统的两路差频信号的频率差值图,可知该方法实现了对 -49 dBm 微弱信号毫赫兹级别的频率测量精度。阿伦方差稳定度实验结果如图5(b)所示,本振光增强系统输出信号均表现出较好的频率稳定性,阿伦方差为 $2 \times 10^{-13}@1\text{ s}$ 及 $2.1 \times 10^{-15}@10\ 000\text{ s}$,证明本文方法实现了对微弱射频信号的高精度频率测量。

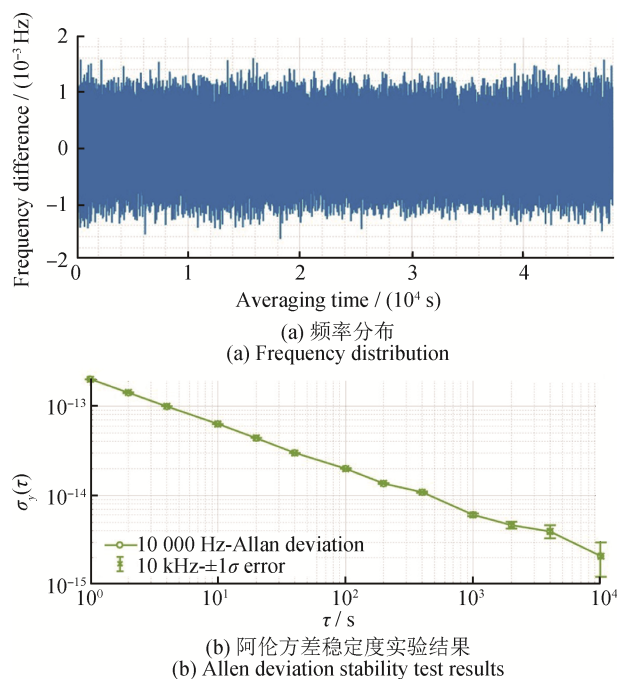


图5 使用双混频时差法实验本振光增强下信号的稳定度
Fig.5 Stability measurement of signals under local oscillator optical enhancement using the dual mixing time-delay method

3 结论

本研究团队提出了一种基于本振光增强的双混频时差微弱频率信号检测方法,利用高功率本振光提高了光电混频信号强度,并通过双混频差分检测实现对微弱频率偏移的高灵敏度检测。实

验结果表明：该方法在保持高信噪比的同时，可实现微赫兹级频率分辨率，并有效抑制共模噪声和光路抖动对测量精度的影响，成功实现了-49 dBm的接收灵敏度；使用双混频时差法对频率稳定度进行检测，阿伦方差为 $2 \times 10^{-13}@1 \text{ s}$ 及 $2.1 \times 10^{-15}@10\,000 \text{ s}$ 。

与传统强度调制/直接探测方法相比，基于本振光增强的双混频时差微弱频率信号检测方法在强链路衰减条件下仍可保持较高的检测灵敏度；与全相干接收与远程本振分发方法相比，该方法所使用的系统复杂度和成本更低。该方法为高精度时间频率传递及微弱信号检测提供了有效的技术手段，适用于光纤频率传递、光钟网络互联等场景。未来可结合量子增强光源及数字信号处理优化方案，进一步提升该方法的性能，为高精度频率检测和时间同步提供有力支撑。

参考文献

- [1] LIU C X, SHANG J M, ZHAO Z Z, et al. Ultrastable long-haul fiber-optic radio frequency transfer based on dual-PLL [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(1): 7100108.
- [2] PRINCE K, MONROY I T. All-optical envelope detection and fiber transmission of wireless signals by external injection of a DFB laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(15): 1317-1319.
- [3] JACOBS I S, BEAN C P. Fine particles, thin films and exchange anisotropy (effects of finite dimensions and interfaces on the basic properties of ferromagnets)[C]// *Spin Arrangements and Crystal Structure, Domains, and Micromagnetics*. Amsterdam: Elsevier, 1963, 330(7): 271-350.
- [4] XIA J J, BOUMAIZA S. A Novel broadband linear-in-magnitude RF envelope detector with enhanced detection speed and accuracy [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2015, 25(5): 325-327.
- [5] YU S S, ZHAO W Y, XUE W X, et al. Microwave frequency dissemination over a 250 km fiber link with stability at the 10^{-18} level [J]. *Photonics*, 2023, 10(8): 872.
- [6] GLAUBER R J. The quantum theory of optical coherence [J]. *Physical Review*, 1963, 130(6): 2529-2539.
- [7] REN W J, SUN J F, CONG H S, et al. Sensitivity deterioration of free-space optical coherent/non-coherent OOK modulation receiver by ambient light noise [J]. *Sensors*, 2023, 23(4). DOI: 10.3390/s23042140.
- [8] 董毅, 谢玮霖, 薄天外, 等. 基于科斯塔斯环的零差相干光接收技术 [J]. *光学学报*, 2025, 45(13): 459-468.
- DONG Y, XIE W L, BO T W, et al. Optical homodyne receiver based on costas loop [J]. *Acta Optica Sinica*, 2025, 45(13): 459-468. (in Chinese)
- [9] 魏江杰. 零差相干光通信关键技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- WEI J J. Research on key technology of homodyne coherent optical communication [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)
- [10] GAO H, ZHAO Z Z, CHENG J H, et al. Cascaded stable radio frequency dissemination over 960-km fiber link [C]// 2023 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), San Jose, CA, USA. IEEE, 2023: 1-2.
- [11] GAO H, ZHAO B D, ZHAO Z Z, et al. Multi-nodes dissemination of stable radio frequency with 10^{-17} instability over 2 000 km optical fiber [J]. *Optics Express*, 2023, 31(16): 25598.
- [12] CHA J, WOO W, CHO C, et al. A highly-linear radio-frequency envelope detector for multi-standard operation [C]// 2009 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium, Boston, MA, USA. IEEE, 2009: 149-152.
- [13] ZHOU Y P, HUANG G C, NAM S, et al. A novel wide-band envelope detector [C]// 2008 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium, Atlanta, GA. IEEE, 2008: 219-222.
- [14] 董瑞芳, 项晓, 权润爱, 等. 双向量子时间同步研究进展 [J]. *计测技术*, 2025, 45(4): 1-11.
- DONG R F, XIANG X, QUAN R A, et al. Research progress on two-way quantum time synchronization [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2025, 45(4): 1-11. (in Chinese)
- [15] IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. IEEE standard definitions of physical quantities for fundamental frequency and time metrology — random instabilities: IEEE Std 1139-2022[S]. 2022.
- [16] 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.
- 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. (in Chinese)
- [17] 张晓菁, 白金海, 胡栋. 激光器自动锁频方法研究综述[J]. 计测技术, 2024, 44(1): 60-72.
ZHANG X J, BAI J H, HU D. Review of automatic frequency locking methods for lasers[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(1): 60-72. (in Chinese)
- [18] 许玲玲, 孙建锋, 卢智勇. 无感相干探测激光雷达技术[J/OL]. 中国激光, 2025[2025-11-30]. <https://link.cnki.net/urlid/31.1339.TN.20250815.1612.048>.
XU L L, SUN J F, LU Z Y. Stealth coherent detection LiDAR technology[J/OL]. Chinese Journal of Lasers, 2025[2025-11-30]. <https://link.cnki.net/urlid/31.1339.TN.20250815.1612.048>. (in Chinese)
- [19] 刘东祥, 王玉琢, 徐倩, 等. 自由空间激光时频传递技术研究进展[J]. 时间频率学报, 2025, 48(1): 36-49.
LIU D X, WANG Y Z, XU Q, et al. Advances in free-space laser time-frequency transfer techniques[J]. Journal of Time and Frequency, 2025, 48(1): 36-49. (in Chinese)
- [20] 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. Perspectives on the development of metrological science and technology[J]. Metrology & Measurement Technology, 2022, 42(1): 1-8. (in Chinese)
- [21] 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): 1506005.
SUN L, LIU N, CAI Y, et al. Power efficiency theory and system parameter optimization for multicore fiber-based submarine cables[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(15): 1506005. (in Chinese)
- [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 technology of optical fiber communication[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2004. (in Chinese)
- [23] 冷杰兴, 刘军良, 刘倩, 等. 基于高速ADC的数字双混频时差测量系统[J]. 时间频率学报, 2024, 47(1): 34-45.
LENG J X, LIU J L, LIU Q, et al. Digital dual mixer

time difference measurement system based on high-speed ADC[J]. Journal of Time and Frequency, 2024, 47(1): 34-45. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨 刘宇轩)



第一作者: 张运睿(2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高精度光纤频率传递、频率稳定度测量。



作者简介: 高昊(1997—), 男, 博士后, 主要研究方向为光纤时频传递。



通信作者: 罗斌(1983—), 男, 教授, 博士, 长期从事量子光学与量子信息的理论、技术和应用研究, 包括高精度时间频率及其传递、原子滤光、量子成像、大气光传输、快慢光、量子纠缠理论等。主持承担国家自然科学基金等项目, 已发表SCI论文100余篇, 授权国家发明专利20余项, 独立撰写专著一部。担任中国仪器仪表学会量子传感与精密测量仪器分会常务委员等职务。



作者简介: 喻松(1974—), 男, 教授, 博士, 博士生导师。2005年毕业于北京邮电大学电磁场与微波技术专业, 获工学博士学位, 2013年起任北京邮电大学教授。从事高精度时频基准传递等研究, 取得多项自主创新成果, 已发表SCI收录论文50余篇。