

# 基于时频信号副载波调制的光载无线通信链路时延测量方案

郭俊成, 卢麟\*, 吴传信, 张宝富, 魏恒, 赵晓宇

陆军工程大学通信工程学院, 江苏 南京 210007

**摘要** 针对光载无线通信(ROF)链路大量程、高精度时延测量需求,提出了基于时、频、信共传模式下的 ROF 链路时延测量方案。将秒脉冲信号进行副载波调制,使 ROF 信号和时延测量信号同波长传输,解决了秒脉冲测量信号对于 ROF 信号的干扰问题,同时实现了 ROF 传输和高精度时延测量功能。搭建了实验测量系统,验证了 ROF 系统和时延测量系统的兼容共生特性,测量了温度剧烈变化下的 25 km 光纤链路绝对时延及其时延变化。实验结果表明该方法在保证 ROF 链路信号传输质量的情况下能够实现高精度、大量程的链路时延测量。

**关键词** 光通信; 光载无线通信; 传输; 时延; 副载波调制

中图分类号 TN913.1+2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1206005

## Time Delay Measurement Scheme for Radio-over-Fiber Link Based on Time-Frequency Signal Subcarrier Modulation

Guo Juncheng, Lu Lin\*, Wu Chuanxin, Zhang Baofu, Wei Heng, Zhao Xiaoyu

*Institute of Communication Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing, Jiangsu, 210007, China*

**Abstract** We propose a radio-over-fiber (ROF) link delay measurement scheme based on time, frequency, and ROF signal simultaneous transmission to meet the large-range and high-precision delay measurement requirements of ROF links. One pulse-per-second (1PPS) is processed with subcarrier modulation, so that the ROF signal and the delay measurement signal are transmitted at the same wavelength, avoiding the interference of the 1PPS signal to ROF signal and achieving high-precision delay measurement and ROF transmission simultaneously. We build up an experimental system to measure the absolute delay of the ROF signal during the 25 km fiber link at severely changed temperature, which verifies the compatible characteristic of the ROF system and the time-delay measurement system. The experimental results show that the proposed scheme can measure high-precision and large-range link delay without ROF signal degradation.

**Key words** optical communications; radio-over-fiber; transmission; time-delay; subcarrier modulation

**OCIS codes** 060.2310; 060.2300; 060.2630

## 1 引 言

光载无线通信(ROF)链路的大量程、高精度时延测量是分布式探测导航、多基站雷达天线等应用的前提和基础。ROF 链路的时延测量需要依托于已有的光纤链路,故需要在 ROF 系统本身不受影响的情况下进行链路的时延测量<sup>[1-5]</sup>。ROF 链路的时延测量方案主要分为两种。一种是使 ROF 信号和测量信号分别在不同的波长上传输,该方案能够保证测量系统与 ROF 系统相互独立运行,能够将

二者之间的干扰降级到最小,但由于光电/电光转换器件不同、色散不对称等影响,无法保证测量结果的一致性<sup>[6-11]</sup>,例如:由于 G.652 光纤的色散温变系数为  $1.4 \text{ fs} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ ,当两波长间隔为 0.8 nm 时,50 km ROF 链路变化 10 °C 带来的时延差为 1.12 ps<sup>[12]</sup>,此时两束波长的时延值并不一致。另一种是将 ROF 信号和测量信号同波长传输,该方法可以解决测量一致性的问题,但是在直接调制、外调制模式下 ROF 链路通信质量都会受到时延测量信号的影响<sup>[12-13]</sup>。时延测量系统与 ROF 系

收稿日期: 2019-07-25; 修回日期: 2019-08-12; 录用日期: 2019-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(61673393,61371121)

\* E-mail: Nj\_lulin@163.com

统如何在实现各自功能的情况下兼容共生是亟待解决的问题。

本文提出了基于时、频、信单波长共传模式下的光纤链路时延测量方案。该方案将秒脉冲信号进行副载波调制,解决了秒脉冲测量信号对于 ROF 信号的干扰问题,保证了时延测量系统与 ROF 系统的有效兼容,在完成高精度、大量程的链路时延测量功能的基础上,能够满足 ROF 信号传输的低失真要求。

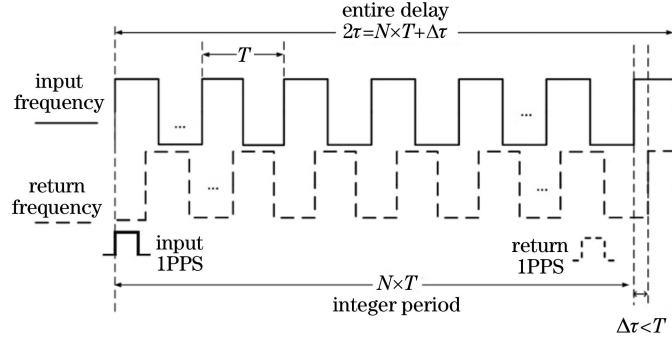


图 1 时延测量时序图

Fig. 1 Sequence diagram of time-delay measurement

首先由钟源产生同源同相的 1PPS 信号(input 1PPS)和频率信号(input frequency),将两信号调制到同一波长上后,在 ROF 链路中对其进行传输测量。假设频率信号的周期为  $T$ ,那么频率信号相邻的两个上升沿或下降沿之间的时间间隔将严格等于  $T$ 。链路时延可以被划分为  $T$  的整数倍部分和不足  $T$  的部分。假设单向时延为  $\tau$ ,这里认为不足  $T$  的部分为  $\Delta\tau$ ,那么总的链路时延  $2\tau$  为

$$2\tau = N \times T + \Delta\tau. \quad (1)$$

链路总时延  $2\tau$  可分解为图 1 所示的  $N \times T$  和  $\Delta\tau$  两个部分。第一部分  $N \times T$  时延,由发送秒脉冲(input 1PPS)与返回秒脉冲(return 1PPS)之间的整数周期个数决定。第二部分是小于一个周期的  $\Delta\tau$  时延, $\Delta\tau$  可表示为

$$\Delta\tau = \frac{\Delta\varphi(t)}{2\pi f_0}, \quad (2)$$

式中: $\Delta\varphi(t)$  为由具有相位测量功能的比相器比较本地频率信号与返回的频率信号(return frequency)之间的相位差; $f_0$  为测量不足一个周期时延部分的频率信号的中心频率。以  $f_0 = 100$  MHz 的频率信号为例,其周期为 10 ns,故粗测结果的测量分辨率为 10 ns 量级,10 ns 以内的细测结果由比相器比相测得,对粗、细测量结果进行算数拼接求和,依据该原理的链路测量时延(FTD)即为

## 2 基于时频信号副载波调制的 ROF 链路时延测量方案

### 2.1 时频共传时延测量原理

时频共传的时延测量方法<sup>[14]</sup>,是通过发射模块将秒脉冲信号(1 Pulse Per Second, 1PPS)与频率信号调制到同一光载波上,从而使两信号同时在光纤中传输。此时,在保证时延完全相同的情况下分别测量两信号在链路中的时延,测量时序图如图 1 所示。

所测得的链路真时延。由于时钟计数器的粗测结果测量范围广、量程比较大,比相法中频率信号的细测结果拥有较好的分辨率,因此这种粗细测量结合的方法能够同时满足大量程、高分辨率的测量要求。

### 2.2 基于副载波调制的时、频、信共传方法

时频测量信号与 ROF 链路同波长共传的核心问题是如何避免两类信号的相互干扰。由于 1PPS 信号为秒脉冲信号,相当于周期为 1 s 的方波信号,因此其傅里叶变换后的频谱是由以 sinc 函数为包络的离散点组成的,其频率成分理论上会延伸至无穷远处。而 ROF 信号为基带信号调制后的载波信号,其频域关系如图 2(a)所示,其中 1PPS 为秒脉冲信号, $f_r$  为 ROF 链路中的已调数字频率信号(ROF 信号)的中心频率。

由于传递过程中存在调制、解调过程中的非线性效应,同时光电检测过程中光信号的调制边带之间还存在着彼此差拍,如果不对 1PPS 信号进行处理,直接进行混合传递,则在 ROF 信号中心频率  $f_r$  附近会出现 1PPS 时间信号的分量,这相当于将 1PPS 信号调制到 ROF 信号中心频率处,如图 2(b)所示。然而,1PPS 信号的谱线间隔为 1 Hz,普通带通滤波器很难实现如此窄的带宽,即使部分研究中用伪随机码作为 1PPS 信号,其频带宽度也在 kHz 量级,所以 ROF 信号中心频率  $f_r$  周围的干扰分量

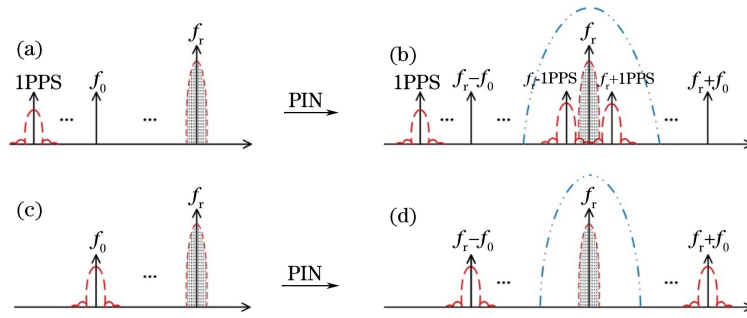


图 2 1PPS 信号的副载波调制原理。(a) ROF 信号为基带信号时的频域关系；(b) 1PPS 信号调制到 ROF 信号中心频率处的频域关系；(c) 新的时频信号混合传递时的频域关系；(d) 信号传递到接收端再经光电检测后的频域关系  
 Fig. 2 Principle of subcarrier modulation of 1PPS signal. (a) Frequency domain relation when ROF signal is baseband signal; (b) frequency domain relation when 1PPS signal is modulated to the center frequency of ROF signal; (c) the frequency-domain relation for the new time-frequency signal mixed transmission; (d) the frequency domain relation after the signal is transmitted to the receiving end and then photoelectric detection

仍然很难被滤除, ROF 信号质量劣化。另外, 由于 1PPS 信号是基带信号, 而 ROF 信号中心频率  $f_r$  的频点一般远大于其主体频谱范围, 因此可以通过低通滤波恢复 1PPS 信号。故 ROF 信号不会对 1PPS 信号造成干扰。

基于上述原因, 为防止 ROF 信号被 1PPS 信号干扰, 本文提出一种新的时频信号混合传递的方法, 其原理如图 2(c) 所示。首先将 1PPS 信号用副载波调制的方式调制到  $f_0$  处, 使二者交调后产生的干扰信号的中心频点从光载波信号的中心频率  $f_r$  处转移至  $f_r \pm f_0$  处, 以留出足够的频带宽度对 ROF 信号进行滤波。由于副载波调制后, 副载波信号边模离 ROF 信号较远 (如 100 MHz), 因此 1PPS

的谐波分量幅度极小, 干扰可忽略不计。当信号传递到接收端再经光电检测后的信号如图 2(d) 所示, 此时用一个中心频点为  $f_r$ 、带宽大于  $2f_0$  的滤波器即可滤除  $f_r$  附近的干扰边带, 1PPS 信号的干扰将被有效抑制。

### 3 实验与分析

#### 3.1 实验方案

时、频、信同传输测量方案如图 3 所示, 该系统包含 2 个部分, 即时延测量模块和 ROF 信号传输模块。在 ROF 传输链路中, 1.5 GHz ROF 信号由矢量信号源 R&S-SMBV100A 产生。ROF 信号传输与时延测量系统的不同在于其方向的单一性, 该信

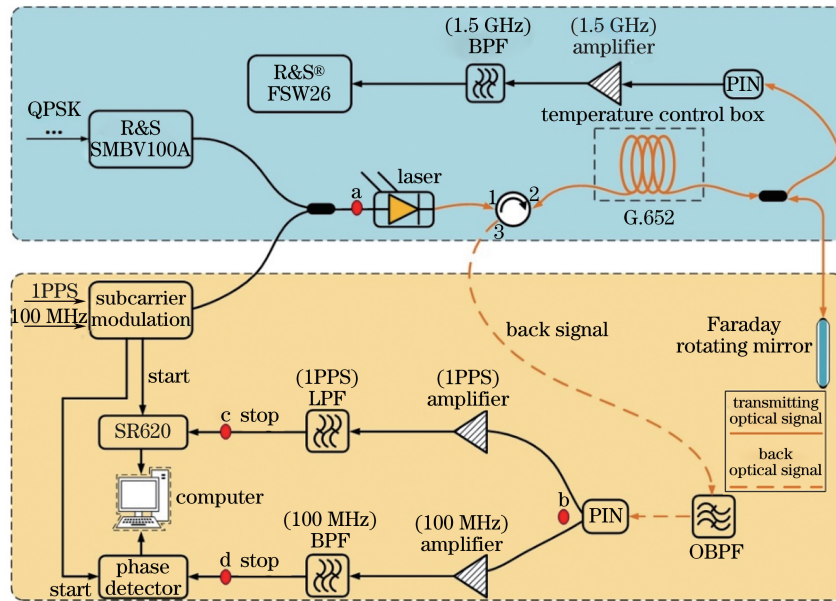


图 3 时延测量方案

Fig. 3 Scheme of time-delay measurement

号在链路末端只需要进行接收、滤波、放大和解调。在 ROF 链路的基础上搭建时延测量系统,首先由铷原子钟产生同源同向的 1PPS 信号和 100 MHz 频率信号。其中,一路 1PPS 信号作为本地时延粗测单元的 start 信号连接到时间间隔测量仪 SR620 的第 1 通道(CH1),一路 100 MHz 信号作为本地端细测单元的本地频率比对信号连接到具有相对相位延迟测量功能的比相器的第 1 通道(CH1),由同源同相的 1PPS 信号与 100 MHz 信号直接调制产生副载波调制信号 1PPS \*。

已调 ROF 信号(1.5 GHz)与副载波调制信号 1PPS \* 和 100 MHz 信号合路, Tektronix MDO3102 示波器所测量 a 点合路信号如图 4(a)所示,从图中可以看到 1.5 GHz 信号叠加在 100 MHz

波形中。1PPS 信号按照级数展开形式与 100 MHz 信号、1.5 GHz 信号的合路信号时域表达式为

$$V_{E0}(t) = A \sum_{n=1}^{+\infty} \text{Sa}\left(\frac{2\pi f_{1\text{PPS}^*} n \tau_{1\text{PPS}^*}}{2}\right) \cos(2\pi f_{1\text{PPS}^*} n t) + B \cos(2\pi f_{100\text{M}} t) + C \cos(2\pi f_{1.5\text{G}} t), \quad (3)$$

式中: Sa(·)表示抽样函数;A、B、C 分别为 1PPS、100 MHz、1.5 GHz 的幅度系数;  $f_{1\text{PPS}^*}$ 、 $f_{100\text{M}}$ 、 $f_{1.5\text{G}}$  分别为 1 Hz、100 MHz、1.5 GHz 频率信号;  $n$ 、 $\tau_{1\text{PPS}^*}$  分别为调制阶数与脉冲宽度。(3)式第一项为秒脉冲副载波调制信号 1PPS \* 按照级数形式展开的表达式,第二项为 100 MHz 频率信号的表达式,第三项为 1.5 GHz 频率信号的表达式。合路信号经过激光器调制到光载波上,载波波长为 1545.3 nm。

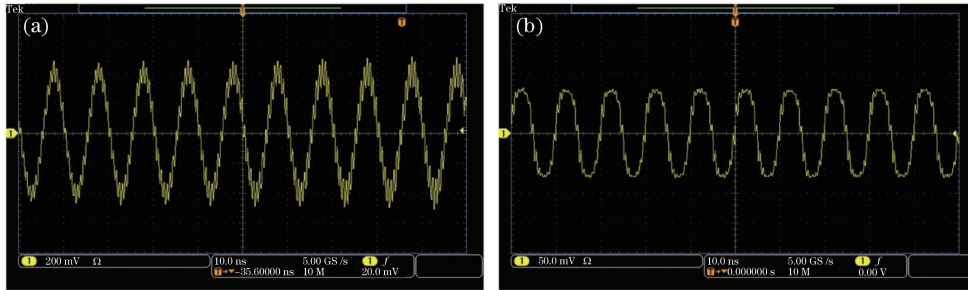


图 4 合路信号波形图。(a) 1PPS \* +100 MHz+1.5 GHz 初始合路信号;(b) PIN 检测的合路信号  
Fig. 4 Waveforms of combined signal. (a) Original combined signal of 1PPS \* +100 MHz+1.5 GHz;  
(b) combined signal in PIN detection

发送光信号通过一环形器后进入 G.652 单模光纤。光纤末端连接 50:50 的光纤耦合器,耦合器的一端输出口连接中心频率为 1.5 GHz、带宽小于 200 MHz 的滤波器以滤除传输过程中的差拍谐波和 1PPS \* 已调信号,后经放大、滤波得到恢复 1.5 GHz ROF 信号。

耦合器输出口另一端光信号进入法拉第旋转镜并经原光纤返回。返回光信号由光电检测器(PIN)检测,图 2 中 b 点检测到的光电转换信号如图 4(b)所示,可以看到合路信号相对幅度减小,返回后的信号表达式为

$$V_{ET}(t) = \sum_{n=1}^{+\infty} A'_n \cos[2\pi n f_{1\text{PPS}^*} (t + \tau)] + \sum_{n=1}^{+\infty} B'_n \cos[2\pi n f_{100\text{M}} (t + \tau)] + \sum_{n=1}^{+\infty} C'_n \cos[2\pi n f_{1.5\text{G}} (t + \tau)] + \sum_{n=1}^{+\infty} D'_n \cos[2\pi n (f_{1\text{PPS}^*} \pm f_{100\text{M}}) (t + \tau)] + \sum_{n=1}^{+\infty} E'_n \cos[2\pi n (f_{1\text{PPS}^*} \pm f_{1.5\text{G}}) (t + \tau)] + \sum_{n=1}^{+\infty} F'_n \cos[2\pi n (f_{100\text{M}} \pm f_{1.5\text{G}}) (t + \tau)], \quad (4)$$

式中:  $A'_n$ 、 $B'_n$ 、 $C'_n$  分别为检测到的 1PPS \* 秒脉冲信号、100 MHz 频率信号和 1.5 GHz ROF 信号的幅度系数;  $D'_n$ 、 $E'_n$ 、 $F'_n$  分别为各拍频谐波的幅度系数。从(4)式中可以看出,1PPS \* 信号与 1.5 GHz ROF 信号在传输过程中存在三种信号两两拍频的相互串扰和高次谐波干扰,返回本地端信号的目的是完成链路时延的测量功能,两测量信号分别经滤

波器以滤除 1.5 GHz 干扰信号及其拍频谐波信号。

经过低通滤波、放大后在图 2 中 c 点测得 1PPS 信号,如图 5(a)所示,信号峰值电压为 0.9 V,其上升沿光滑,满足时间间隔测量仪 SR620 的判决条件。将恢复的 1PPS 信号作为 stop 连接到 SR620 的第 2 通道(CH2),从而测得链路时延的整数周期部分。由于粗测量只取 10 ns 整数阶的测量结果,



放大失真带来的额外抖动在百皮秒量级,因此饱和放大不会对测量结果带来劣化影响。图 5(b)中脉冲波形为恢复的 100 MHz 信号,对其进行带通滤波

和放大处理。处理后的 100 MHz 频率信号进入比相器的第 2 通道(CH2)用于细测,从而可对链路时延不足整数周期的时延进行测量。

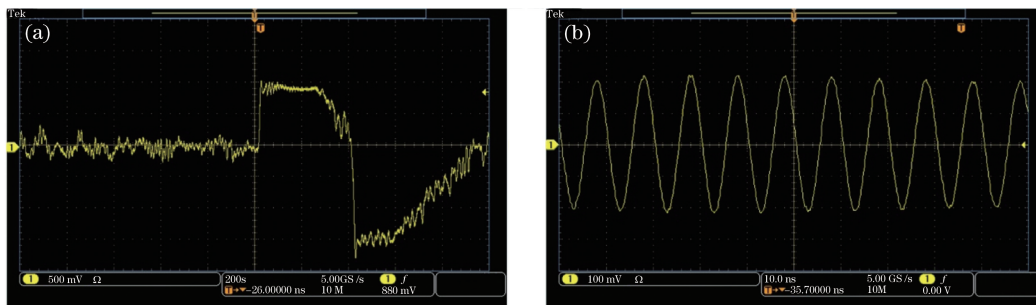


图 5 时间信号波形图。(a)恢复出的 1PPS\* 信号;(b)恢复出的 100 MHz 信号

Fig. 5 Waveforms of time-frequency signals. (a) Restored 1PPS\* signal; (b) restored 100 MHz signal

### 3.2 实验结果

实验首先对比了副载波调制前后的 1.5 GHz 信号频谱图,然后对稳定室温环境下的 25 km 光纤链路时延进行测量,验证了基于时延测量信号和 1.5 GHz ROF 信号同时传输的可行性。最后对 25 km 长距离光纤链路温度剧烈升降条件下的链路时延和 ROF 传输性能进行了测量。

#### 3.2.1 副载波调制的 1.5 GHz 频谱

实验首先对比了 1PPS 直接混合传输和副载波调制后的 1.5 GHz 信号频谱。R&S © FSW26 频谱功能视图下,1PPS 信号副载波调制前后 1.5 GHz

信号的频谱图如图 6 所示。图 6(a)、(b)中虚线频谱均为 1.5 GHz 信号直接传输下对终端恢复信号的频谱图。图 6(a)中实线频谱为当 1PPS 信号没有经过副载波调制直接进行测量时的 1.5 GHz 信号频谱图,可以发现当 1PPS 信号未经副载波调制时,以 1.5 GHz 为中心频点,相对频率带宽范围在 500 Hz 以内的信号区域具有明显的 1PPS 信号脉冲包络,产生了许多箭头所示的残余边带影响,50 Hz 内残余边带影响的峰瓣比为 20 dB。图 6(b)中实线频谱为当 1PPS 信号经过副载波调制后生成的 1PPS\* 信号参与测量时的 1.5 GHz 信号频谱图,此时光纤

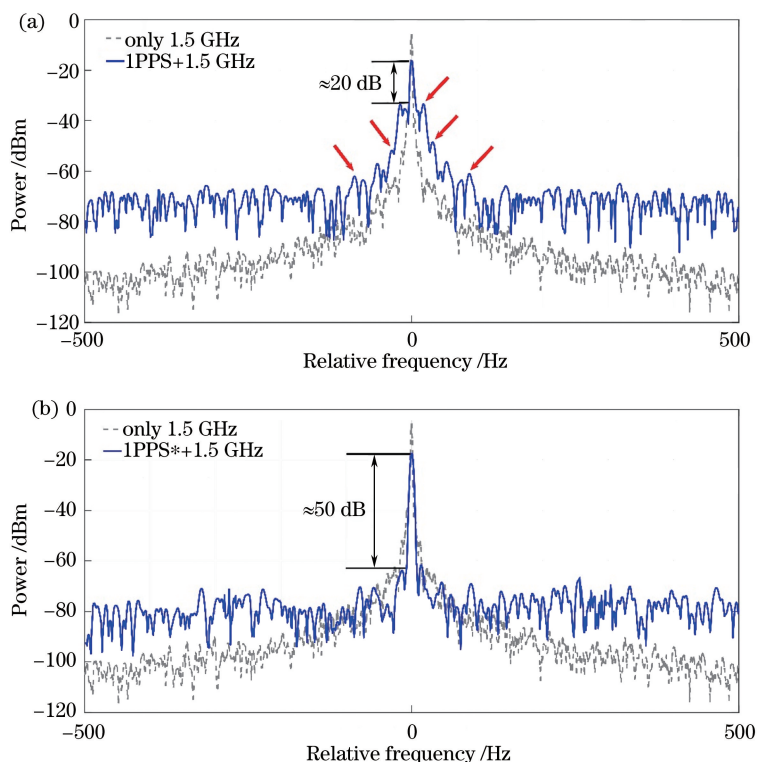


图 6 1.5 GHz 信号频谱图。(a)直接混合调制;(b)副载波调制

Fig. 6 Spectra of 1.5 GHz signal. (a) Directly mixed modulation; (b) subcarrier modulation

链路终端恢复的1.5 GHz信号噪声水平相较于未调制信号有明显的提升,50 Hz内峰瓣比为50 dB,接近于底噪水平,证明基于副载波调制下 1PPS \* 信号对于1.5 GHz ROF 信号的影响具有明显的改善作用,可实现 ROF 信号正常传输。

### 3.2.2 时延测量系统与 ROF 链路兼容性验证实验

为研究时延测量系统与 ROF 链路的相互影响,首先在 25 km 链路的基础上对时频共传(仅有测量链路)与 时、频、信共传(测量链路 与 ROF 链路共存)两种模式下的时延实验测量结果进行了对比。

图 7(a)、(b)分别为测量链路中引入 1.5 GHz 信号前后的时延结果。当仅有测量链路时,图 7(a)中实线代表的系统粗测值波动范围为 247994 ~ 247998 ns,FTD 值由图中虚线所示,其时延均值为 247996.63743 ns,时延均方差为 0.0471 ps;引入 1.5 GHz 后的测量结果如图 7(b)所示,系统粗测值波动范围仍为 247994 ~ 247998 ns, FTD 时延均值为 247996.61976 ns,时延均方差为 0.0344 ps,与仅

有测量链路时的测量结果保持同量级。由此验证 1.5 GHz 已调信号引入前后对本系统的测量结果几乎无影响。

图 8 中对比了 1.5 GHz 源信号、1.5 GHz ROF 信号直接传输、1PPS 信号在未经副载波调制下与 100 MHz 和 1.5 GHz 混传、1PPS 信号经副载波调制后与 100 MHz 和 1.5 GHz 信号混传 4 种传输模式下的 EVMRMS (误差向量幅度)结果。从结果中可以看到:当秒脉冲信号未经副载波调制(1PPS + 100 MHz + 1.5 GHz)时,不同调制格式下的 EVMRMS 结果波动范围为 3.5% ~ 5.5%,这正是每次 1 s 的秒脉冲干扰所致。当秒脉冲信号经副载波调制后,各调制模式下的 EVMRMS 测量结果与 1.5 GHz 信号直接传输时的测量值并无绝对差异,由此可以得出当秒脉冲信号经过副载波调制后,两类系统共存的情况下,1.5 GHz 的 ROF 信号仍然可以保持无失真的传输质量。这一优势在 ROF 信号为模拟信号或 ROF 链路需实时不间断通信时更为突出。

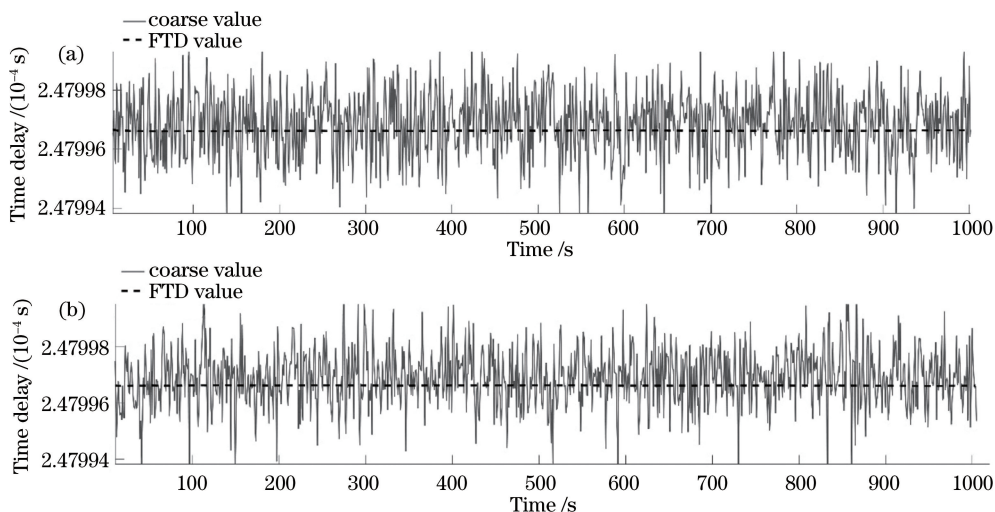


图 7 25 km 链路本底时延。(a)仅有测量链路;(b)测量链路 与 ROF 链路共存

Fig. 7 Background time-delay of 25 km link. (a) Only with measurement links; (b) with ROF and measurement links

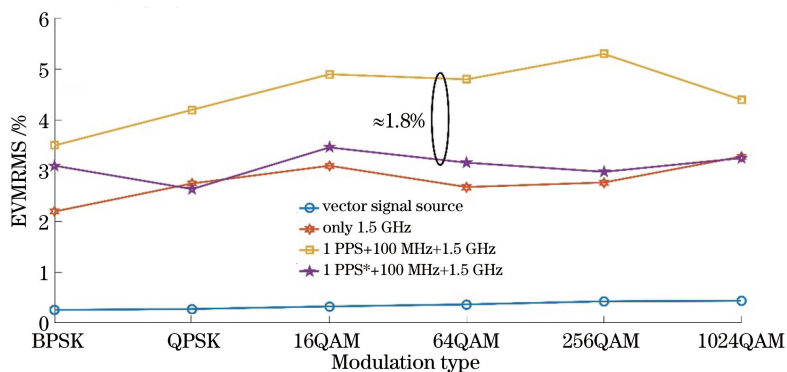


图 8 系统 EVMRMS 值

Fig. 8 EVMRMS of system

3.2.3 25 km 光纤链路温度剧变实验

将25 km光纤放进温控箱中,以温控箱内的温度控制来模拟实际环境中的温度变化。为直观体现链路温度变化给延迟波动带来的影响,设定温控箱的温度由室温 24 °C 上升到 35 °C,并持续运行 10000 s,之后打开温控箱门使其内部温度自然回落至室温,将最初稳定环境下的 8000 s 测量时间加入测量环节中,整个测量过程持续 38000 s。由于实验中 25 km 光纤为整盘光纤,10000 s 内的恒定运行下能够保证光纤温度持续上升,其中 30 °C 下的时延稳定区间为 5000 s。当外界环境温度变化 10 °C 时,若光纤时延变化系数为 30 ps/(km·°C)左右,则理论上时延变化为 17 ns,实验中测得传播延迟变化约 15 ns,考虑到盘纤延迟的滞后效应,该结果符合理论及相关文献中的报道<sup>[14]</sup>。

图 9 为恒温箱温度变化 38000 s 的粗测量、细测量和 FTD 测量的结果。在 10000 s 的升温过程中,图 9(a)表示的系统粗测时延由原 25 km 本底时延 247996.0 ns 变化至 248011.0 ns。图 9(b)中的细

测时延变化值超过 2 个周期,细测时延均值由前 8000 s 内的 6.63453 ns 变化至 35 °C 光纤稳定温度下的 9.98653 ns。打开温控箱门,温度自然回落至 23~26 °C,粗、细测量时延均恢复至初始值附近。图 9(c)为依据测量原理由粗、细测量结果计算得到的 FTD 值,从图中可以看到:FTD 值较粗测结果收敛性得到极大改善,30000 s 后恢复稳定的 FTD 均方差为 0.0375 ps,与链路温度稳定时的测量结果量级一致。

图 10(a)、(b)分别展示了温变条件下时延测量值的阿伦方差、1.5 GHz 信号各调制模式的 EVMRMS。依据时延测量原理下的 FTD 系统秒稳定度如图 10(a)所示,可以看出:秒稳定度由粗测结果的  $1.31 \times 10^{-10}$  优化至  $6.68 \times 10^{-14}$ ,按照秒稳定度与测量精度的对应关系<sup>[15]</sup>,其精度约为 0.03 ps。本团队研究得到的无 1.5 GHz 信号下的测量结果方差为  $4.62 \times 10^{-14}$ <sup>[14]</sup>,两者相比秒稳定度在同一量级。因此,可以看出 1.5 GHz 信号对本测量系统的影响可以忽略不计。

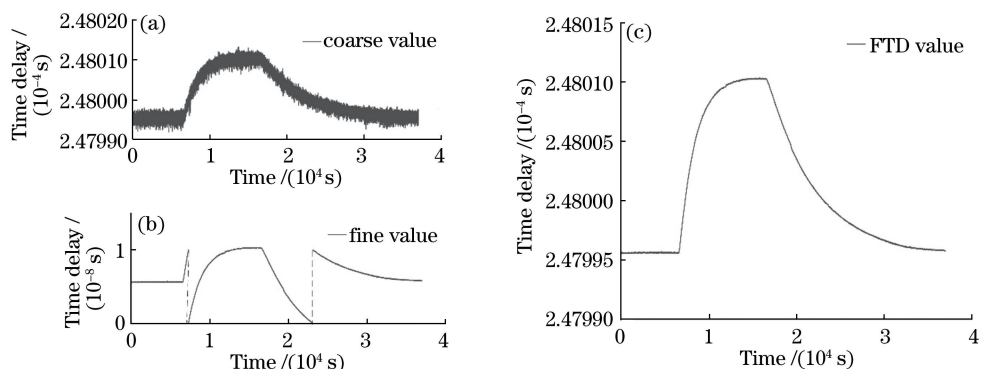


图 9 25 km 链路温度升、降时延测量结果。(a)粗测结果;(b)细测结果;(c) FTD 结果

Fig. 9 Time delay of 25 km fiber link when temperature rises and falls. (a) Coarse value; (b) fine value; (b) FTD value

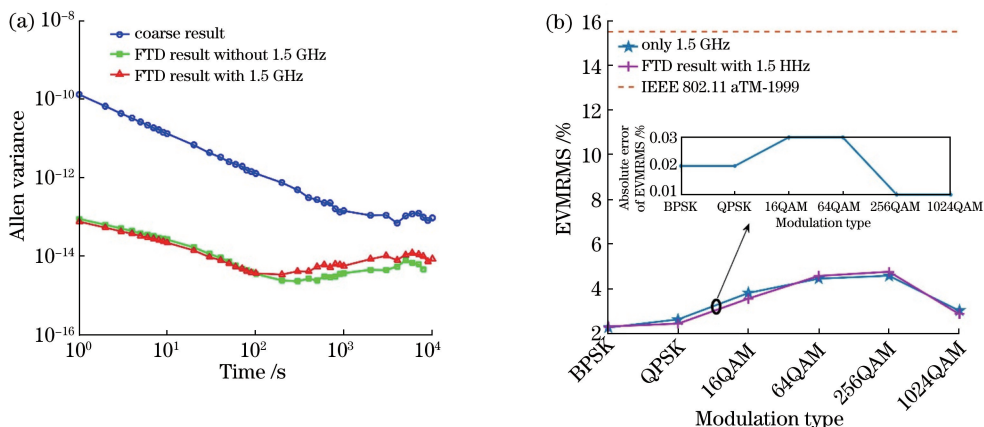


图 10 阿伦方差和 1.5 GHz 信号的 EVMRMS 值。(a)阿伦方差;(b) 1.5 GHz 信号的 EVMRMS 值

Fig. 10 Allen variance and EVMRMS of 1.5 GHz signal. (a) Allen variance; (b) EVMRMS of 1.5 GHz signal

1.5 GHz 的误差向量幅度 EVMRMS 的比较如图 10(b)所示,在温度剧烈变化的 25 km 链路中,不同调制格式下直传 1.5 GHz 信号的 EVMRMS 结果与加入测量系统后 EVMRMS 结果的波动范围均为 2%~4.5%,两者的 EVMRMS 误差绝对值小于 0.05%,说明本文提出方案可以使延迟测量系统与 ROF 链路兼容共生,对 ROF 通信性能的影响可忽略不计,且远高于 IEEE 802.11aTM-1999 下的 15.5%通信标准<sup>[16]</sup>。该结果验证了基于副载波调制下的时延测量方案对于保证 1.5 GHz 信号质量的可行性。

## 4 结 论

提出了一种基于时、频、信同波长共传的 ROF 链路时延测量方法,利用时频信号的副载波调制实现 ROF 链路与时延测量系统兼容共生。搭建了 ROF 链路时延测量系统,实验结果表明:ROF 链路与时延测量系统的互扰可忽略不计,时延测量系统在 25 km G.652 光纤链路及温度变化条件下,能够实现 0.03 ps 分辨率的绝对延迟测量,同时可保证 ROF 信号传输质量,该研究验证了时延测量系统与 ROF 链路同波长共传方案的有效性。

## 参 考 文 献

- [1] Lopez O, Haboucha A, Chanteau B, *et al.* Ultra-stable long distance optical frequency distribution using the Internet fiber network[J]. *Optics Express*, 2012, 20(21): 23518-23526.
- [2] Yu J Y, Li S Y, Zheng X P, *et al.* Highly linear transmission and EVM improvement of vector modulation signals for radio-over-fiber applications [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(10): 100606.
- [3] Miyamoto K, Tashiro T, Fukada Y, *et al.* Transmission performance investigation of RF signal in RoF-DAS over WDM-PON with bandpass-sampling and optical TDM[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(22): 3477-3488.
- [4] Clivati C, Bolognini G, Calonic D, *et al.* Distributed Raman optical amplification in phase coherent transfer of optical frequencies [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(17): 1711-1714.
- [5] Wang X C, Liu Z, Wang S W, *et al.* Photonic radio-frequency dissemination via optical fiber with high-phase stability [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(11): 2618-2621.
- [6] Predehl K, Grosche G, Raupach S M F, *et al.* A 920-kilometer optical fiber link for frequency metrology at the 19th decimal place [J]. *Science*, 2012, 336(6080): 441-444.
- [7] Wang L D, Wu G L, Shen J G, *et al.* Simultaneous transfer of time and frequency over 100 km fiber link [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0406004.  
王灵东, 吴龟灵, 沈建国, 等. 基于 100 km 光纤链路的时间和频率同时传递 [J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0406004.
- [8] Woodward S L, Nelson L E, Feuer M D, *et al.* Characterization of real-time PMD and chromatic dispersion monitoring in a high-PMD 46-Gb/s transmission system [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(24): 2048-2050.
- [9] Droste S, Ozimek F, Udem T, *et al.* Optical-frequency transfer over a single-span 1840 km fiber link [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(11): 110801.
- [10] Grosche G. Eavesdropping time and frequency: phase noise cancellation along a time-varying path, such as an optical fiber [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(9): 2545-2548.
- [11] Zhao X Y, Lu L, Wu C X, *et al.* Ring fiber network based multipoint time-frequency dissemination method with high precision [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(6): 0606002.  
赵晓宇, 卢麟, 吴传信, 等. 基于光纤环形网的多点高精度时频传递方法 [J]. *光学学报*, 2019, 39(6): 0606002.
- [12] Yu L Q, Wang R, Lu L, *et al.* Stable radio frequency dissemination by simple hybrid frequency modulation scheme [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(18): 5255-5258.
- [13] Jiang Z Z, Dai Y T, Zhang A X, *et al.* Precise time delay sensing and stable frequency dissemination on arbitrary intermediate point along fiber-optic loop link with RF phase locking assistance [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(2): 7200809.
- [14] Guo J C, Lu L, Wu C X, *et al.* Time delay measurement of optical fiber link using time-frequency joint transfer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 0906003.  
郭俊成, 卢麟, 吴传信, 等. 基于时频共传的光纤链路时延测量方法 [J]. *光学学报*, 2019, 39(9): 0906003.
- [15] Amemiya M, Imae M, Fujii Y, *et al.* Simple time and frequency dissemination method using optical fiber network [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2008, 57(5): 878-883.
- [16] Lin M L, Zhang Q J, Xu Q H. EVM simulation and its comparison with BER for different types of modulation [C] // TENCON 2007-2007 IEEE Region 10 Conference, October 30-November 2, 2007, Taipei, Taiwan, China. New York: IEEE, 2007: 9822861.