

# 分布式宽带微波光纤传输幅相一致性技术

张 浩<sup>1</sup>, 杨海峰<sup>2</sup>, 李 琰<sup>1</sup>, 夏运霞<sup>3</sup>, 田思玉<sup>1</sup>, 何 磊<sup>1</sup>, 王世腾<sup>1</sup>, 阚鹏飞<sup>1</sup>, 孙力军<sup>1</sup>

(1. 重庆光电技术研究所, 重庆 400060; 2. 中国西南电子技术研究所, 四川成都 610036;  
3. 中国科学院光电技术研究所, 四川成都 610209)

**摘要:** 针对分布式宽带微波频率信号光纤传输的幅相一致性, 本文设计了一种反馈控制方案。由于无法通过待传输宽带微波信号直接获取光纤传输时延信息, 引入了一个点频参考信号。由于参考信号和待传输宽带微波信号在同一根光纤中波分复用传输, 参考信号可以感知和反馈光纤传输时延及其波动。为了满足多路信号接收的幅相一致性, 设计了基于光开关的轮询式多路幅度和相位检测; 为了实现高精度大范围光纤时延波动补偿, 设计了基于光开关的多比特可调光纤延迟线。本文搭建了分布式宽带微波频率信号光纤传输实验平台, 演示了两路宽带微波频率信号 50 km 光纤传输实验。结果表明, 两路微波信号在 20 GHz 带宽范围内幅度一致性优于 4.4 dB, 40 GHz 频率信号传输的相位一致性优于 11.8°。

**关键词:** 光纤; 分布式; 宽带微波; 幅相一致性

中图分类号: TN29 文献标志码: A 文章编号: 1672-2337(2021)02-0178-05

## Amplitude-Phase Consistency of Wideband Microwave Frequency Distribution over Multi-Access Optical Fiber Links

ZHANG Hao<sup>1</sup>, YANG Haifeng<sup>2</sup>, LI Xuan<sup>1</sup>, XIA Yunxia<sup>3</sup>, TIAN Siyu<sup>1</sup>, HE Lei<sup>1</sup>, WANG Shiteng<sup>1</sup>, QU Pengfei<sup>1</sup>, SUN Lijun<sup>1</sup>

(1. Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, China;  
2. Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China;  
3. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

**Abstract:** In this paper, a feedback control scheme is proposed for the fiber-optic wideband microwave frequency distribution. Amplitude-phase consistency can be achieved for multi-access. Since the wideband microwave frequency cannot provide the fiber propagation delay and its variation, a reference frequency signal is introduced. With wavelength division multiplexing (WDM) transmission along the same fiber, the reference frequency signal can sense and feed back the fiber delay information. For the amplitude and phase detection, optical switch is adopted, which is of great importance in the time division multiplexing (TDM) mode. For the fiber delay compensation with high precision and large range, multi-bit fiber delay line is implemented. Moreover, a multi-access wideband microwave frequency distribution testbed is established. And a proof of concept experiment is demonstrated for two end users with the fiber extension of 50 km. The amplitude consistency of less than 4.4 dB is observed in a 20 GHz bandwidth. And the phase consistency of below 11.8° is realized for the 40 GHz frequency transmission.

**Key words:** fiber-optic; multi-access; wideband microwave; amplitude-phase consistency

## 0 引言

由于具有低损耗、大带宽和抗电磁干扰等优势, 光纤光学吸引着众多科研工作者和研究机构, 持续推动着微波光子相关领域的发展。高性能宽带微波频率信号在重大基础设施和工程中发挥着

重要作用, 特别是深空探测、天线拉远和雷达协同组网等大规模分布式应用场景<sup>[1-3]</sup>。然而, 光纤传输时延会随着温度和振动等外界环境变化而变化<sup>[4-5]</sup>, 经光纤传输后的宽带微波信号将发生相位噪声、频率稳定度的显著恶化, 多路宽带微波信号间的幅相一致性也无法保证, 无法满足远端用户协同组网对高性能宽带微波频率信号的需求。

针对分布式宽带微波频率信号光纤传输的特点,本文设计了反馈控制环路。该控制环路包括光纤传输时延波动检测和补偿两部分。由于无法通过待传输宽带微波信号直接获取光纤传输时延波动,检测部分引入一个点频参考信号<sup>[6]</sup>。由于参考信号和待传输宽带微波信号在同一根光纤中传输,参考信号可以感知和反馈光纤传输时延及其波动。为了满足多路信号接收的幅相一致性,本文设计了基于光开关的轮询式多路幅度和相位检测。考虑到普通单模光纤传输时延随温度的变化系数为35 ps/(km·°C),即使掩埋在地下的长距离光纤,年传输时延波动也可能超过100 ns。为了实现大范围高精度光纤时

延波动补偿,本文设计了基于光开关的多比特可调光纤延迟线。通过反馈控制环路,本文搭建了两路宽带微波频率信号光纤传输实验平台,演示了50 km光纤传输实验,并详细测试分析了幅相一致性的具体性能。

## 1 实验原理

图1给出了分布式宽带微波光纤传输幅相一致性调控原理图。忽略信号幅度,位于中心站点的待传输宽带微波频率信号可以表示为

$$V_1 = \cos(\omega_s t + \theta_s) \quad (1)$$

式中,  $\omega_s$  和  $\theta_s$  为角频率和初始相位。

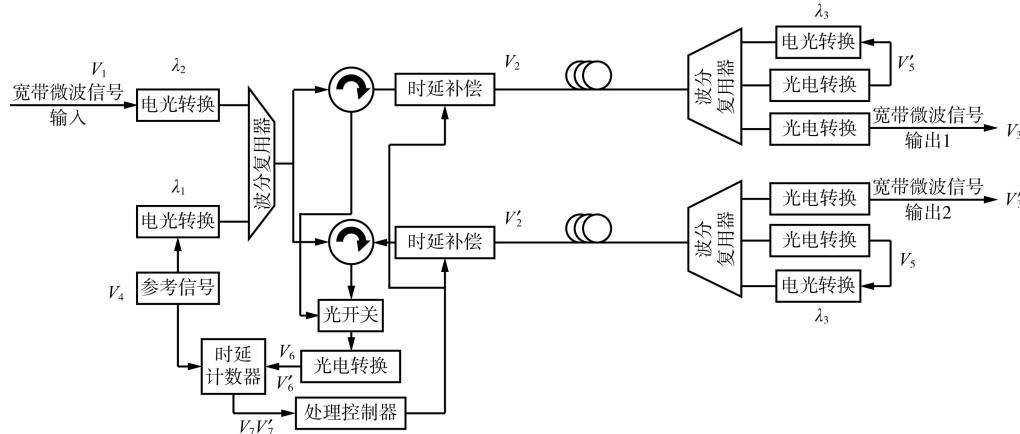


图1 分布式宽带微波光纤传输原理图

通过电光转换,待传输宽带微波频率被加载到波长为  $\lambda_2$  的光信号上。为了描述方便简洁,以两个用户站为例。经波分复用器、光耦合器、环形器和时延补偿器后,光载宽带微波信号在星型光纤拓扑结构中传输。中心站发送宽带微波频率信号可以表示为

$$V_2 = \cos[\omega_s(t - t_c^t - t_{dl}) + \theta_s] \quad (2)$$

$$V'_2 = \cos[\omega_s(t - t_c^t - t_{d2}) + \theta_s] \quad (3)$$

式中,  $t_c^t$  为波分复用器、光耦合器、环形器等无源路由器件的附加时延,  $t_{dl}$  和  $t_{d2}$  为两路时延补偿器的附加时延。

在用户接收站,波分复用器提取出接收到的光载宽带微波信号,并通过光电转换还原为微波信号。两路信号可以分别表示为

$$V_3 = \cos[\omega_s(t - t_c^t - t_{dl} - t_{fl} - t_{ul}^r) + \theta_s] \quad (4)$$

$$V'_3 = \cos[\omega_s(t - t_c^t - t_{d2} - t_{f2} - t_{ul}^r) + \theta_s] \quad (5)$$

式中,  $t_{fl}$  和  $t_{f2}$  为连接中心站和2个用户的光纤

传输时延,  $t_{ul}^r$  和  $t_{ul}^r$  为2个用户站宽带微波信号接收附加时延。

由于光纤传输时延  $t_{fi}$  ( $i=1,2$ ) 随温度、振动等外界环境变化而变化,相对于中心站的发送,用户站点接收的宽带微波信号幅度和相位不稳定;同时,由于两段光纤的外界环境变化不同,2个用户站点接收的宽带微波信号幅度和相位不一致。为了消除环境对分布式用户站点接收微波信号幅相的影响,需要采用负反馈控制环路。由于无法通过待传输宽带微波信号直接获取光纤传输时延波动信息,环路引入一个点频参考信号  $\omega_r$ ,如下式所示:

$$V_4 = \cos(\omega_r t + \theta_0) \quad (6)$$

式中  $\theta_0$  为初始相位。由于参考信号和待传输宽带微波信号在同一根光纤中传输,参考信号可以感知和反映光纤传输时延波动。

中心站参考信号分为两路。一路参考信号经电

光转换加载到波长为  $\lambda_1$  的光载波上后,依次经过波分复用器、环形器和时延补偿器输入对应光纤传输链路。在用户接收端,光载参考信号经波分复用提取和光电转换还原为微波信号,可以表示为

$$V_5 = \cos[\omega_r(t - t_c' - t_{dl} - t_{fl} - t_{ul}') + \theta_0] \quad (7)$$

$$V'_5 = \cos[\omega_r(t - t_c' - t_{dl} - t_{fl} - t_{ul}'') + \theta_0] \quad (8)$$

式中,  $t_c'$  为参考信号在中心站经过波分复用器、光耦合器、环形器等无源光器件的附加时延,  $t_{ul}'$  和  $t_{ul}''$  为 2 个用户站参考信号接收附加时延。

本文采用环回法获取光纤链路传输时延波动。为了消除长距离传输过程中瑞利散射和光纤端面反射等噪声对中心站接收参考信号信噪比的影响, 用户站点采用波长为  $\lambda_3$  的光载波将恢复的参考信号发送回中心站点。为了避免非线性光纤色散对传输时延的影响, 3 个波长保持等间隔且  $\lambda_2$  位于中间值。中心站接收的参考信号可以表示为

$$V_6 = \cos[\omega_r(t - t_c' - t_c' - 2t_{dl} - 2t_{fl} - t_{ul}' - t_{ul}') + \theta_0] \quad (9)$$

$$V'_6 = \cos[\omega_r(t - t_c' - t_c' - 2t_{dl} - 2t_{fl} - t_{ul}'' - t_{ul}'') + \theta_0] \quad (10)$$

式中,  $t_c'$  为参考信号经过中心站环形器、光开关和光电转换的附加时延,  $t_{ul}'$  和  $t_{ul}''$  为 2 个用户站参考信号发送附加时延。需要指出的是, 为了简化中心站点在大规模传输分配时的系统复杂度, 本文采用了轮询式时延检测方式。该方式通过光开关的路由切换, 分时轮询检测各路光纤传输时延。

在中心站, 环回参考信号和另一路本地参考信号在时延计数器(或鉴相器)中实现光纤链路传输时延及其波动的检测。根据式(6)和式(9)、式(10), 获得的误差信号可以表示为

$$V_7 = \cos[\omega_r(t_c' + t_c' + 2t_{dl} + 2t_{fl} + t_{ul}' + t_{ul}')] \quad (11)$$

$$V'_7 = \cos[\omega_r(t_c' + t_c' + 2t_{dl} + 2t_{fl} + t_{ul}'' + t_{ul}'')] \quad (12)$$

尽管中心站和用户站的发射和接收时延在反馈控制环路外, 但一般可以视为恒定; 即使在室内温度大范围波动的情况下也可以通过温度系数标定或者恒温控制来避免其对系统传输性能的影响。因此, 根据式(11)或式(12), 可以通过误差信号来控制时延补偿器, 使得每路包含时延补偿器和光纤链路的总共时延保持为特定常数。从式(4)和式(5)可以看出, 用户站点接收的微波信号据此保持相位恒定, 即实现宽带微波信号的分布式稳相传输; 另一方面, 若两路总共时延的差值控制并保

持在同一数值(忽略发射和接收时延的影响), 即可实现分布式微波信号传输分配的相位一致性。对于具有一定带宽的微波信号, 需要保持光纤传输链路时延的绝对一致, 才能实现宽带微波信号的相位一致性。绝对时延的测量可以协同使用多个点频参考信号。

对于时延补偿器, 本文设计了基于光开关的多比特可调光纤延迟线, 通过高精度小范围可调时延和大范围固定时延相结合的方式来实现大范围高精度光纤时延波动补偿, 如图 2 所示。



图 2 基于光开关的多比特可调光纤延迟线

此外, 还可以根据参考信号的幅度变化, 感知不同距离的光传输链路损耗及其变化, 从而实现分布式宽带微波信号的幅度一致性。

## 2 实验设计

图 3 给出了分布式宽带微波频率光纤传输实验原理图。整个实验系统置于普通空调房间内, 日温度波动约 3 ℃。宽带微波频率信号经带宽为 40 GHz 的电光调制器调制, 被加载到波长为 1 549.32 nm 光信号上。通过偏置电压控制, 电光调制器始终工作于正交状态。在两个用户站, 经 50 km 光纤(绕制在光纤盘上)传输后的光载宽带微波频率信号在带宽为 40 GHz 的光电探测器中恢复为微波信号。作为探针信号, 固定频率为 1 GHz 的参考信号分为两路。一路参考信号调制到波长为 1 551.72 nm 的光上, 并经波分复用器、光分路器、光环形器和时延补偿器后耦合入光纤传输链路。在用户端, 参考信号被光电探测器接收, 并重新调制到波长为 1 546.92 nm 的光上。在中心站, 两路环回参考信号在光开关的控制下被分时接收, 以 100 ms 的周期轮询与另一路参考信号在鉴相器中进行相位比较, 获得的两路光纤时延波动信息用于控制对应时延补偿器, 使得两路接收微波信号实现相位一致。同时, 环回参考信号输入检波器, 获得的信号幅度用于控制双向光放大器增益, 使得两路接收微波信号实现幅度一致。

在每个站点, 使用商用光放大器来获取足够的信号功率, 使用商用光放大器(无隔离器<sup>[7]</sup>来补

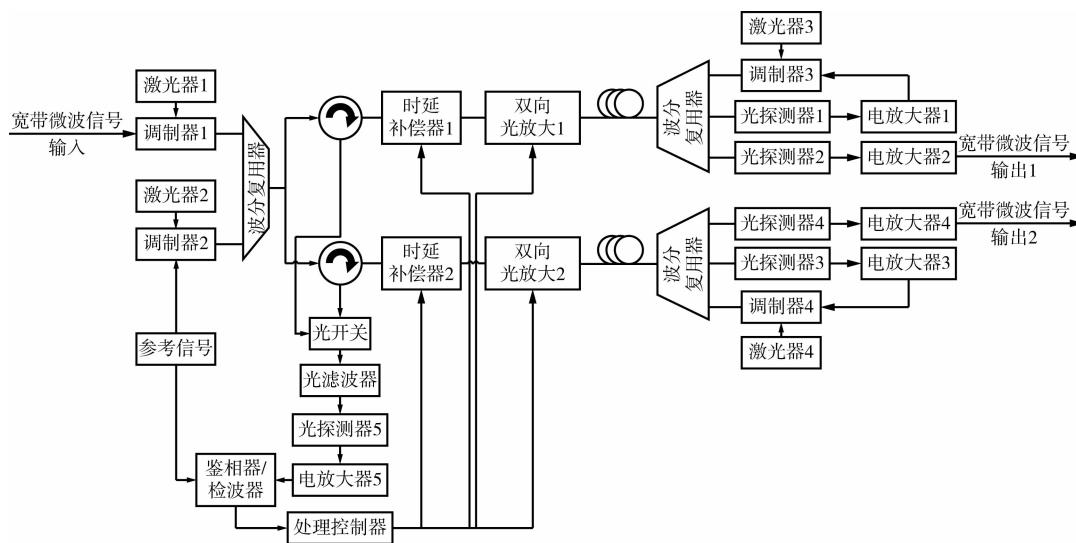


图3 分布式宽带微波光纤传输实验图

偿光纤传输链路损耗,使用 200 GHz 间隔的波分复用器来合并和提取双向传输的三路光信号。时延补偿器使用了 8 bit 可调延迟线,总共时延量为 256 ns。高精度小范围可调时延采用可调范围为 1 ns 的机械式连续光纤延迟线,大范围固定时延使用响应速度为 1 ms 的机械光开关。为了解决宽带微波信号光纤传输的功率衰落,两路 50 km 光纤经色散补偿后的残余色散不超过  $\pm 3 \text{ ps/nm}$ 。

### 3 结果分析

图 4 给出了两个用户站点接收宽带微波频率信号的射频损耗(S21)测试结果。从图中可以看出

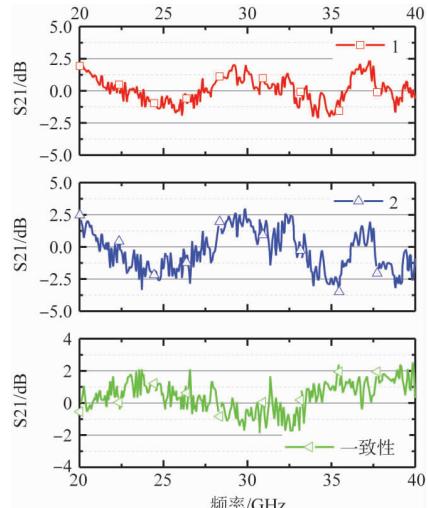


图4 两个用户站点接收宽带微波频率信号的射频损耗(S21)测试结果(上子图为第一路测试结果,中子图为第二路测试结果,下子图为两路一致性)

出,在 20~40 GHz 的频率范围内,单个用户接收微波信号的平坦度分别为  $\pm 2.3 \text{ dB}$  和  $\pm 3.2 \text{ dB}$ ,性能主要取决于使用光电互转换和电放大。为了获得更好的幅度平坦度,可以选用匹配度更好的光电互转换模块和电放大器。同时,两个用户站的幅度一致性在全频段内优于  $\pm 2.2 \text{ dB}$ ,随时间的变化几乎可以忽略。

对于两路微波信号的相位一致性,为了更好地表征反馈控制环路对外界环境的跟踪特性,本文测试了在单路信号没有稳相情况下的两路接收相位一致性,如图 5 所示。传输频率为 40 GHz。从图中可以看出,在 300 s 时间范围内,单路微波信号相位波

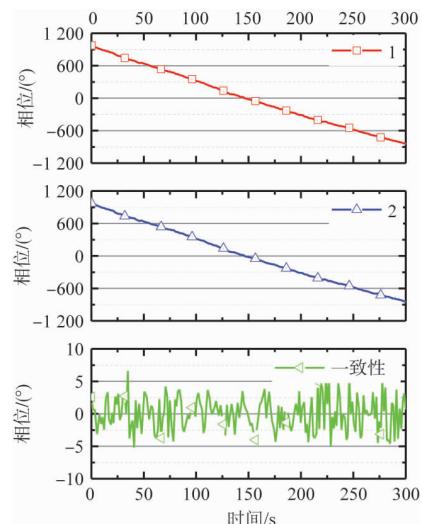


图5 两个用户站点接收宽带微波频率信号的相位随时间变化情况(传输频率为 40 GHz,上子图为第一路测试结果,中子图为第二路测试结果,下子图为两路一致性)

动超过  $1800^\circ$ (绝对时延变化为 125 ps)。通过反馈控制环路,两路微波信号相位一致性的峰峰值不超过  $11.8^\circ(0.82 \text{ ps})$ ,标准差为  $2.6^\circ(0.18 \text{ ps})$ 。

## 4 结束语

针对分布式宽带微波频率信号光纤传输的幅相一致性,本文设计了反馈控制方案,并搭建了传输实验平台,演示了两路宽带微波频率信号 50 km 光纤传输实验。两路微波信号在 20 GHz 带宽范围内,幅度一致性优于  $\pm 2.2 \text{ dB}$ ,40 GHz 频率信号的相位一致性优于  $\pm 5.9^\circ$ 。结果表明,该控制方案可以促进微波光子在相关重大基础设施和工程中的大范围应用,提高对应的性能指标,并加速其更新换代。

## 参考文献:

- [1] CHEN Zhiyu, ZHOU Tao, ZHONG Xin, et al. Stable Downlinks for Wideband Radio Frequencies in Distributed Noncooperative System[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(19):4514-4518.
- [2] ZHANG Hao, HE Lei, LI Xuan, et al. Wideband Microwave Frequency Distribution for Multi-Access Along a Single Fiber Link[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38:1688-1692.
- [3] LI Zonglei, YAN Lianshan, LUO Bin, et al. Phase Fluctuation Cancellation for Uplink Radar Arrays
- [4] ASHBY N, HOWE D A, TARLOR J, et al. Optical Fiber Vibration and Acceleration Model[C]// IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 21st European Frequency and Time Forum, Geneva, Switzerland: IEEE, 2007:547-551.
- [5] PINKERT T J, BOLL O, WILLMANN L, et al. Effect of Soil Temperature on Optical Frequency Transfer Through Unidirectional Dense-Wavelength-Division-Multiplexing Fiber-Optic Links[J]. Applied Optics, 2015, 54(4):728-738.
- [6] ZHANG H, XIAO Y, QU P, et al. Active Delay Stabilization of a 440-km Fiber Link in a Wideband Microwave Delay System[J]. Photonics Journal, 2019, 11(1):1-7.
- [7] Śliwczynski Ł, KREHLIK P, CZUBLA A, et al. Dissemination of Time and RF Frequency via a Stabilized Fibre Optic Link Over a Distance of 420 km[J]. Metrologia, 2013, 50(2):133-145.

## 作者简介:



张 浩 男,1989 年出生,重庆人,博士,主要研究方向为微波光子频率综合技术、光纤时间频率传递技术。

(上接第 171 页)



张业斌 男 1988 年生,安徽铜陵人,博士,高级工程师,主要研究方向为微波光子技术。

(上接第 177 页)



薛晓晓 男,1985 年生,山东潍坊人,清华大学电子工程系副教授,主要研究方向为微波光子学和非线性光学。



张方正 男 1984 年生,河北保定人,博士,南京航空航天大学电子信息工程学院教授、博士生导师,主要研究方向为微波光子学与雷达成像技术。



郑小平 男,1965 年生,江苏靖江人,清华大学电子工程系教授,主要研究方向为微波光子学、光网络与光通信。