

文章编号:1001-5078(2024)01-0104-06

· 光电技术与系统 ·

## 基于微波光子的复合式时频传输技术研究

赵炳旭<sup>1,2</sup>, 吕晓萌<sup>1,2</sup>, 徐敏<sup>1</sup>, 陈昌锐<sup>1,2</sup>, 严灵杰<sup>1</sup>, 谢翔宇<sup>1,2</sup>, 刘洋志<sup>1</sup>, 李希斌<sup>1,2</sup>, 乔澜<sup>1</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第二十九研究所, 四川 成都 610029; 2. 四川省宽带微波电路高密度集成工程研究中心, 四川 成都 610029)

**摘要:**光载射频传输技术在地基无源探测、分布式阵列合成孔径、空间探测等诸多领域具有广泛的应用,用于实现不同子阵之间的信号互连与信号相参。针对传统光载射频传输技术中相位稳定度低、时延变化大、易受环境影响等问题,本文提出一种复合式微波光子时频传输技术,通过结合被动和主动时频传输技术,分别实现了本振点频信号的光纤分发和中频宽带信号的光纤回传,联合两者之间技术优势实现了系统的相位高稳定度和宽带信号传输的目的。本系统可实现本振信号、中频信号在中心端和远端的时频稳相传输。通过对比实验和综合测试,实现1.6 GHz本振和 $(1.6 \pm 0.5)$  GHz中频信号的稳相传输,传输距离为5 km,经过在 $-40 \sim +70$  °C的环境试验验证,温度变化范围内上下行微波光子链路中相位波动小于 $\pm 1.5^\circ$ 。

**关键词:**微波光子学;分布式阵列;时频传输技术

中图分类号:TN929.1;O436 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2024.01.015

## Research on composite time-frequency transmission technology based on microwave photonics

ZHAO Bing-xu<sup>1,2</sup>, LYU Xiao-meng<sup>1,2</sup>, XU Min<sup>1</sup>, CHEN Chang-rui<sup>1,2</sup>, YAN Ling-jie<sup>1</sup>,  
XIE Xiang-yu<sup>1,2</sup>, LIU Yang-zhi<sup>1</sup>, LI Xi-bin<sup>1,2</sup>, QIAO Lan<sup>1</sup>

(1. The 29th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu 610029, China;

2. Sichuan Province Engineering Research Center for Broadband Microwave

Circuit High Density Integration, Chengdu 610029, China)

**Abstract:** Optical radio-frequency transmission technology has a wide range of applications in ground-based passive detection, distributed array synthetic aperture, and space detection, and many other areas, used to achieve signal interconnection and signal coherence between different sub-arrays. In this paper, a composite microwave photonic time-frequency transmission technology is proposed in this paper to address the problems of low phase stability, large time delay variation, and susceptibility to environmental influences in traditional optical Radio over fiber technology. By combining passive and active time-frequency transmission technology, the fiber distribution of the local oscillator point frequency signal and the fiber return transmission of the intermediate frequency broadband signal are achieved respectively, and the technical advantages of the two are combined to achieve the purpose of the system's high stability of the phase and broadband signal transmission. This system can realize the time-frequency stable phase transmission of the local oscillator signal and the intermediate frequency signal at the center end and the remote end. Through comparative experiments and comprehensive tests, the stable phase transmission of 1.6 GHz local oscillator and  $(1.6 \pm 0.5)$  GHz

作者简介:赵炳旭(1994-),男,硕士,工程师,主要研究方向为光子信息技术。E-mail:379152900@qq.com

收稿日期:2022-12-20;修订日期:2023-03-21

intermediate frequency signal is realized, and the transmission distance is 5 km. After environmental test verification at  $-40 \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$ , the phase fluctuation in the upstream and downstream microwave photonics link within the temperature change range is less than  $\pm 1.5^\circ$ .

**Keywords:** microwave photonics; distributed array; time-frequency transmission technology

## 1 引言

近年来,地基无源探测、分布式合成孔径雷达、空间探测等领域发展迅速<sup>[1-3]</sup>,这些系统需通过光缆将中心端与各个远端站点之间实现射频信号互连和同步相参,从而实现系统在探测距离、探测精度的大幅度提升。由于光缆在长距离传输具有体积小、频带宽、灵活度高、抗干扰能力强等特点<sup>[4-5]</sup>,微波光子传输链路成为系统在长距离微波信号传输与分配的优选方案<sup>[6-7]</sup>,但光缆中微波信号的相位会随着温度、应力、振动等外界因素产生抖动,其主要原因是温度、外界应力等环境因素导致光缆有效长度、折射率等因素变化,导致光程和传输时延的变化。基于微波光子的时频传输技术,可以使得经过长距离光传输的微波信号在远端站点与近端站点之间保持相位稳定,以其相位稳定度高、传输距离长、布阵灵活度高等特点被国内外广泛研究<sup>[8-11]</sup>。

目前时频传输系统的相位补偿方式主要分为两种,第一种是主动稳相方式<sup>[12-13]</sup>,通过主动补偿器件(可调光延迟线、压控振荡器等)与控制算法对光路产生的传输时延变化进行补偿;第二种是被动稳相方式<sup>[14-15]</sup>,利用混频相消的机理对传输信号相位进行预补偿,从而消除光链路产生的相位抖动。主动稳相方式可以实现宽带信号的稳相传输,但是主动稳相方法的相位补偿范围有限,单一的主动补偿器件无法满足宽温的相位补偿要求,且在相位稳定性和补偿速度上具有不足。而被动稳相方式的相位补偿速度快、补偿范围大,但由于存在倍频和混频的方式无法实现宽带信号传输,只能实现单一频点稳相传输功能。因此,根据以上问题,本文提出了一种复合式时频传输系统传输技术,将主动和被动稳相方式相结合,分别实现了本振信号(点频信号)的收发和中频信号的回传(宽带信号)。

本文首先对时频传输系统原理进行了分析,并基于此理论设计了基于微波光子的复合式双向时频传输系统,利用单根光纤实现本振和中频信号在中心站和远端之间的双向传输,传输距离为 5 km。对该

复合式时频传输系统进行测试,在  $-40 \sim +70 \text{ }^\circ\text{C}$  的温度变化范围内,闭环测试过程中,系统实现了信号相位变化量小于  $\pm 1.5^\circ$ ,实现了中心站和远端之间的高度信号相位同步和相参。

## 2 设计原理

在时频传输系统中常使用往返鉴相原理,信号在光缆中传输时,外界环境因素导致相位变化的速率远小于光信号在光缆中传输的速率,故可等效光信号在光缆中往返传输的相位变化量相等,即:

$$\phi_{\text{forward}} = \phi_{\text{back}} = \phi_m \quad (1)$$

其中,  $\phi_{\text{forward}}$  代表光信号从中心端到远端过程中的相位变化量;  $\phi_{\text{back}}$  代表光信号从远端到达中心端的相位变化量。检测光信号从中心端传输至远端,而后返回中心端,信号相位可表示为下式:

$$\begin{aligned} \phi_j &= \phi_{\text{ref}} + \phi_{\text{forward}} + \phi_{\text{back}} \\ &= \phi_{\text{ref}} + 2\phi_m \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $\phi_j$  代表光信号从中心端到达远端而后通过相同光链路返回至中心端的信号相位;  $\phi_{\text{ref}}$  代表信号的初始相位值。通过检测光信号往返链路携带的相位变化信息可构建相位补偿方案,实现信号稳相传输。

主动稳相方式传输的是宽带中频信号,主动稳相将系统链路中产生的误差使用光延迟线(VOD)、压控振荡器(VCO)等相位补偿器件进行校正。基准信号功分 2 路其中一路通过调制器调制到光波长为  $\lambda_2$  的载波上,此信号经过光缆传输至远端后返回中心端,根据相位往返理论,返回信号可由下式表示:

$$S_1 \propto \cos(\omega_1 t + \phi_{\text{ref}} + 2\phi_m) \quad (3)$$

返回中心端后经过光电转换转化为电信号,与基准信号功分的另一路进行鉴相对比,可提取到与链路相位误差  $\phi_m$  对应的电压值  $V$ ,根据误差信息与对应的电压值  $V$  利用比例积分微控制(PID)等算法进行反馈控制,使 VOD 将光链路中引入  $-\phi_m$ ,使光缆中产生的误差被抵消。传输的中频宽带信号经过调制器调制到光波长为  $\lambda_1$  的载波上,经过被 VOD 补偿的光链路后,保持信号初始相位状态到达远端进行信号处理工作。

被动稳相方式传输的为基准本振信号,与主动稳相方式相比,是利用信号的自动补偿原理对链路相位误差进行补偿。被动稳相方式传输的基准本振信号表达式:

$$S_2 \propto \cos(\omega_p t + \phi_{\text{ref}}) \quad (4)$$

首先基准本振信号在中心端进行 1/2 分频处理,经过分频后信号表达式:

$$S_{2-1} \propto \cos\left(\frac{1}{2}\omega_p t + \frac{1}{2}\phi_{\text{ref}}\right) \quad (5)$$

其中,一路经过电光-光电转换后回到中心端,链路相位误差为  $\phi_m$ ,其回到中心端后信号表达式为:

$$S_{2-2} \propto \cos\left(\frac{1}{2}\omega_p t + \frac{1}{2}\phi_{\text{ref}} + \phi_m\right) \quad (6)$$

功分的另一路在本地端进行三倍频处理,经过三倍频处理的信号表达式为:

$$S_{2-3} \propto \cos\left(\frac{3}{2}\omega_p t + \frac{3}{2}\phi_{\text{ref}}\right) \quad (7)$$

在中心端将  $S_{2-2}$  与  $S_{2-3}$  进行混频处理,得到的信号表达式为:

$$S_{2-4} \propto \cos(\omega_p t + \phi_{\text{ref}} - \phi_m) \quad (8)$$

当经过混频后的信号经过链路传输至远端后,链路中的相位误差得到抵消,最终被动稳相方式传输的基准本振信号到达远端后与原始信号的频率与相位保持一致。由于需要分频、混频等处理过程,故无法实现宽带信号的被动稳相方式传输,对于基准本振信号、时间同步信号等具有独特优势。

根据上述理论,设计了一种基于微波光子的复合式时频传输系统,如图 1 所示。系统中心端包括被动相位预校正模块、远端电光互转换模块、中心站电光互转换模块、VOD 光时延控制模块、鉴相与控制模块,远端包括了远端光反馈模块、被动相位锁定模块、电光互转换模块。中心端与远端使用 5 km 光缆相连。

复合式时频传输系统的工作方式为:①点频信号(基准本振信号)从中心端传输至远端时采用被动时频传输方式,信号首先经过被动相位预校正模块进行功分及倍频,经过电光转换将微波信号调制到光信号上,通过光缆将光载射频信号传输至远端,在远端光反馈模块中返回近端完成混频等处理,最终在远端通过光电转换及被动相位锁定模块输出;②宽带信号(宽带中频信号)从远端传输至中心端采用主动时频传输方式,VOD 光时延控制模块产生检测光信号,从

中心端传输至远端,经过远端光反馈模块返回至中心端的鉴相与控制模块中进行相位信息提取与比对,推算出光缆的时延变化量,通过控制 VOD 光时延模块对光缆时延进行实时校正。主动时频传输方式对光缆时延进行校正,与传输光信号无关,故可实现宽带信号(中频信号)的稳相传输功能。

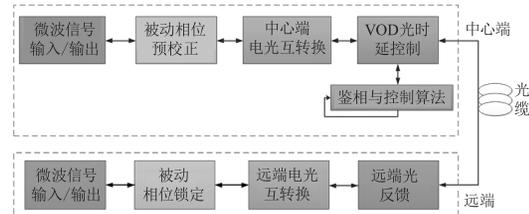


图 1 基于微波光子的复合式时频传输系统原理框图

Fig. 1 Principle block diagram of a composite time-frequency transmission system based on microwave photonics

### 3 实验与结果分析

通过建立微波光子链路来分析在光载射频信号传输过程中,对载波射频信号相位变化的主要影响因素进行分析。利用电光转换模块、传输光缆、以及光电转换模块来组成微波光子传输链路,其中电光转换部分主要包含微波放大器和直调激光器而光电转换部分主要由光电探测器组成,两者之间通过光缆相连。频率为 1.6 GHz 的微波信号依次经过电光转换和光电转换模块,利用矢量网络分析仪来测试传输射频信号的相位与时间的变化关系。首先将电光、光电转换模块采用长光缆(5 km)相连,测试 2 h 内射频信号的相位变化量;而后采用采用短光纤(1 m)直连(back to back, BTB),测试时内的相位变化量,测试模块及光缆在室温环境下放置。相位随时间变化的测试结果如图 2 所示。

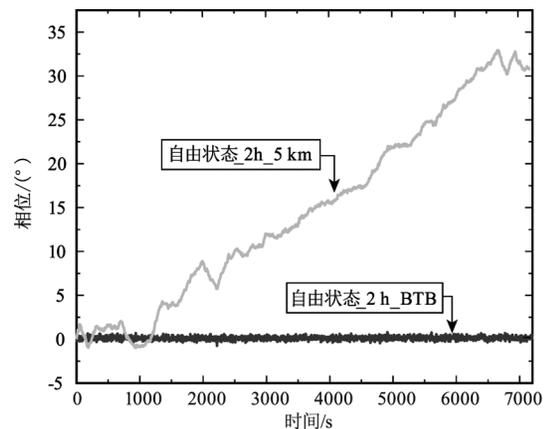


图 2 5 km 光缆与 BTB 相位对比测试图

Fig. 2 Phase comparison test chart of 5km optical cable and BTB

在电光转换、光电转换单元直连(BTB)情况下,

链路在 2 小时内相位变化峰峰值为  $1.3^\circ$ , 加入 5 km 长光缆之后的相同环境条件下, 链路在 2 h 内相位变化峰峰值为  $34^\circ$ 。因此可以推断出, 长距离光缆是影响光载射频信号传输过程中相位变化的主要因素, 主要原因是光缆因为温度变化、应力、机械振动等因素而产生的传输时延变化。利用被动相位预校正模块、中心站电光互转换模块、传输光缆、被动相位锁定模块、远端电光互转换模块等构成被动稳相传输系统, 并通过采用恒温加热设备对 5 km 光缆进行加热, 对比测试采用被动时频稳相传输系统(锁定状态)与关闭时频系统(自由状态)时的微波信号相位变化量与时间的关系, 测试时间为 1 h, 结果如图 3 所示。

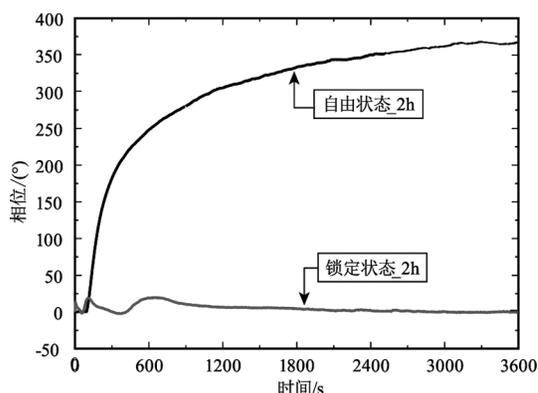


图 3 自由状态与锁定状态的微波信号相位对比测试图

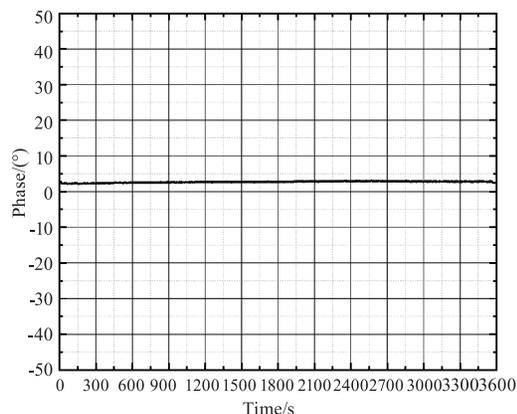
Fig. 3 Phase comparison test chart of microwave signal in free state and locked state

从图中可以看出, 在  $0 \sim 700$  s 的时间范围内, 自由状态下相位变化为  $248^\circ$ , 原因是恒温加热装置开始工作光缆的温度从常温开始剧烈变化, 导致信号在光缆中传输的光程发生较大变化, 从而引起光缆传输时延的变化, 继而影响射频信号相位。时间在  $700 \sim 3000$  s 的时间范围内, 相位变化约为  $113^\circ$ , 原因是随着加热设备的持续工作, 温度差在此时间段内的变小, 此时由温度变化引起的光程光程的变化量减小, 故相位变化量减小。在  $1800 \sim 3600$  s 的时间范围内, 相位变化为  $6^\circ$ , 随着光缆温度逐渐进入平衡状态, 光程与相位变化量同样减小。当系统接入时频传输装置时, 在  $0 \sim 700$  s 的时间范围内, 温度变化剧烈, 时频传输系统对于相位的锁定和反馈时间无法跟上温度导致光程长度的剧烈变化, 信号相位有小幅波动, 变化为  $19^\circ$ ; 当时间达到 1800 s 时, 系统行为变化逐渐稳定, 链路相位变化稳定在为  $\pm 0.5^\circ$ 。

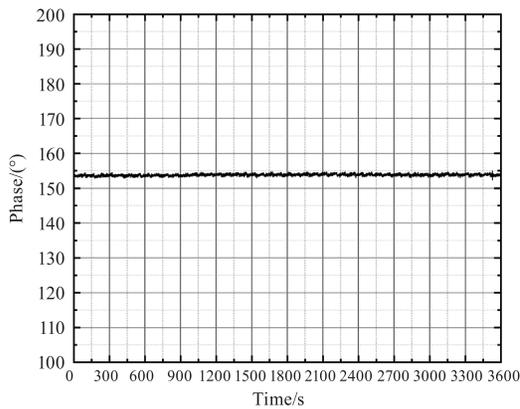
从测试结果显示, 温度变化引起光缆的光程发生变化, 影响微波信号的相位稳定度。当系统未接入时频传输装置时, 信号相位差持续增大, 在 1 h 内相位变化为  $367^\circ$ , 等效时延变化 637.2 ps; 当系统接入时频传输装置时, 信号相位被锁定控制在  $\pm 0.75^\circ$  内, 有效地改善微波信号的稳相传输能力, 实现了信号的相位高稳定传输。

通过将主动和被动时频稳相传输系统的优势进行结合, 构建复合式时频传输系统, 如图 4 所示, 本振信号采用被动时频传输方式实现信号从中心端传输至远端传输; 宽带中频信号(远端 - 中心端)采用主动时频传输方式实现信号从远端传输至中心端传输光缆长度为 5 km, 测试时间为 1 h, 测试环境为室温, 测试信号频率为 1.6 GHz。图 4 给出了采用矢量网络分析仪 CW Time(单频点连续波模式)对链路相位的测试结果。

图 4(a)是本振信号经过时频传输系统的测试结果, 相位变化量锁定在  $\pm 0.5^\circ$  范围内; 图 4(b)是宽带中频信号经过时频传输的测试结果, 主动时频传输方式可将下行信号相位变化量控制在  $\pm 0.7^\circ$  范围内。其中本振传输链路采用被动时频传输方法进行相位补偿, 具有响应速度快、相位稳定度高, 在整个过程中相位曲线平滑稳定。宽带中频信号链路测试结果图中可看到相位会随时间呈现锯齿状变化, 这是由于该信号采用主动时频传输机制, 由于链路中 VOD 变化从而导致相位具有阶跃式变化通过合理设置门限值设置和反馈补偿算法优化即可保证控制精度从实验结果可以看出, 采用复合式时频传输系统可以实现中心站与远端站点之间本振信号与中频信号的稳相互连, 能够保证互连射频信号具有极高的相参性。



(a) 被动时频传输测试结果



(b) 主动时频传输测试结果

图4 复合式时频传输系统的矢量网络分析仪测试结果图

Fig. 4 The test result diagram of the vector network analyzer of the composite time-frequency transmission system

我们对本研究中微波光子的复合式时频传输系统的高低温特性进行摸底以匹配实际使用环境温度因素,并与光载射频传输系统(即关闭时频传输装置)进行了对比测试。中心端的本振信号(频率1.6 GHz)使用5 km 光缆传输至远端,在远端将此信号再经过下行链路返回至中心端,在中心端使用矢量网络分析仪进行相位误差测试。将5 km 光缆放入温箱中进行高低温实验,温箱温度由 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 并保持温度至4800 s,保证5 km 光缆各位置温度均衡,4800~9600 s 时间范围内温度从 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 逐渐上升至 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,测试结果如图5所示。当系统关闭时频传输装置时,在0~3200 s 时间内,相位由 $73^{\circ}$ 变化至 $194^{\circ}$ ,这是由于温箱在保温期间,光缆实际温度仍然在下降导致。在3200~4800 s,相位变化并逐渐趋于稳定,由 $194^{\circ}$ 缓慢变化至 $225^{\circ}$ 。在4800~9600 s 的时间范围内相位变化剧烈,相位由 $225^{\circ}$ 快速变化至 $-1015^{\circ}$ ,这是由于温箱在升温过程中温度变化剧烈。在自由状态下, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  全温状态下信号的相位变化量为 $1240^{\circ}$ 。系统启动复合式时频传输装置时,在全温状态下实现了相位变化量小于 $\pm 1^{\circ}$ 的高稳定度。由试验结果可知,外界温度由 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化至 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  的范围内,当系统启动时频传输装置与关闭时频传输装置时,相同时间内相位峰峰值变化量为1:620,有效地实现了时频传输功能。根据实验5,可知,本文所设计的基于微波光子的复合式时频传输系统可满足全天候的工作需求,同时保证信号相位的高稳定度传输。

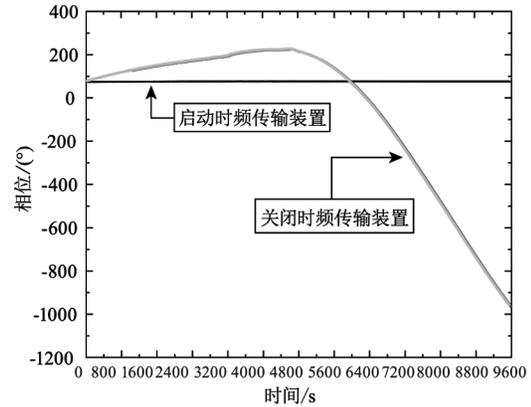


图5 复合式时频传输系统高低温试验结果图

Fig. 5 High and low temperature test results of composite time-frequency transmission system

#### 4 结 论

针对目前各类大型系统中所使用的的时频传输系统稳相形式与手段单一,信号传输类型及相位补偿精度受限等问题,本文将被动时频传输系统与主动时频传输系统结合,提出了一种基于微波光子的复合式时频传输系统,通过被动时频传输方式传输上行本振信号,主动时频传输方式传输下行的宽带中频信号,从而实现上下行信号的高精度时频传输功能。通过对比实验说明了影响相位变化的关键因素是光缆的光程变化同时说明了时频传输系统的必要性,对复合式时频传输系统的上行链路与下行链路进行单独的相位稳定度测试,并在高低温实验的环境下实现了在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度变化范围内信号相位波动 $\pm 1^{\circ}$ 的高精度传输,验证了本文所提出的复合式时频传输系统实际工程应用的合理性,对时频传输技术的研究具有参考意义。

#### 参考文献:

- [1] Liang Guolong, He Xin, Wei Zhonghui, et al. Study of ground-based detection technology of target aircrafts in near space[J]. Infrared, 2013, 34(7): 4. (in Chinese) 梁国龙,何昕,魏仲慧,等. 临近空间目标飞行器地基探测技术研究[J]. 红外, 2013, 34(7): 4.
- [2] Sarno S, D'Errico M, Guo J, et al. Autonomous reconfiguration of a distributed synthetic aperture radar driven by mission requirements[J]. CEAS Space Journal, 2020, 12(4).
- [3] Dong Bin, Liu Lei, Liu Yang, et al. Compact and high power nanosecond laser source for space debris detecting [J]. Laser & Infrared, 2020, 50(8): 953-958. (in Chinese)

- nese)
- 董彬,刘磊,刘洋,等.用于空间探测的结构紧凑高功率纳秒激光脉冲光源[J].激光与红外,2020,50(8):953-958.
- [4] Capmany J,Novak D,Microwave photonics. Combines two worlds[J]. Nature Photonics,2007,1(6):319-330.
- [5] Huang Qiang,Sun Junqiang, Bao Yuben, et al. Advances of technologies in long-range Brillouin optical time-domain reflective optical fiber sensing [J]. Laser & Infrared, 2021,51(4):395-403. (in Chinese)  
黄强,孙军强,包宇奔,等.长距离布里渊光时域反射光纤传感技术进展[J].激光与红外,2021,51(4):395-403.
- [6] Roman J,Nichols L,Wiliams K, et al. Fiber-optic remoting of an ultrahigh dynamic range radar[J]. IEEE Trans. Microw. Theory Tech.,1998,46(12):2317-2323.
- [7] José, Capmany, José, et al. Microwave Photonic Signal Processing[J]. Journal of Lightwave Technology,2013,31(4):571-586.
- [8] Marra G,Margolis H S,Richardson D J. Dissemination of an optical frequency comb over fiber with  $3 \times 10^{18}$  fractional accuracy [J]. Optics Express, 2012, 20(2):1775-1782.
- [9] Chen Nan,Chen Wei,Liu Qin,et al. Time synchronization technique for joint time and frequency transfer via optical fiber[J]. Chinese Journal of Lasers,2015,42(7):146-152. (in Chinese)  
程楠,陈炜,刘琴,等.光纤时间频率同时传递系统中时间同步方法的研究[J].中国激光,2015,42(7):146-152.
- [10] Liang Yifeng,Xu Jiangning,Wu Miao,et al. Research progress on optical fiber time-frequency synchronization technology[J]. Optoelectronics Progress,2020,57(5):45-58. (in Chinese)  
梁益丰,许江宁,吴苗,等.光纤时频同步技术的研究进展[J].激光与光电子学进展,2020,57(5):45-58.
- [11] Gao C,Wang B,Chen W L, et al. Fiber-based multiple-access ultrastable frequency dissemination [J]. Optics Letters,2012,37(22):4690-4692.
- [12] Zhao J,Li D,Ning B,et al. Highly-stable frequency transfer via fiber link with improved electrical error signal extraction and compensation scheme [J]. Optics Express, 2015,23(7):8829-8836.
- [13] Zhang Fan,Hou Dong, Guo Haipeng, et al. Timing delay jitter compensation of a fiber link with active delay compensation[J]. Acta Optica Sinica,2010(3):671-675. (in Chinese)  
张帆,侯冬,郭海鹏,等.光纤时间频率传输的时延抖动主动补偿[J].光学学报,2010(3):671-675.
- [14] Yin F,Li J,Lin J,et al. Stable radio frequency phase delivery by rapid and endless post error cancellation [J]. Optics Letters,2013,38(7):1098-1100.
- [15] Jiang Yao,Zhou Xihua,Yan Xianglei, et al. Point-to-multipoint phase-stabilized microwave signal transmission in optical fiber links using passive phase compensation[J]. Acta Optica Sinica,2019,39(9):86-92. (in Chinese)  
姜瑶,邹喜华,严相雷,等.基于被动补偿的点到多点微波信号光纤稳相传输[J].光学学报,2019,39(9):86-92.