

基于载波抑制双边带的光纤微波频率传递系统优化

孔梦雅,胡亮,陈建平,吴龟灵*

(上海交通大学 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室,上海 200240)

摘要:针对采用分立器件实现载波抑制双边带(DSBCS)调制的被动补偿光纤环路微波频率传递方案的缺陷,对基于DSBCS调制的光纤环路微波频率传递系统进行稳定性优化设计和测试验证,设计了基于微波芯片的一体化接入节点电路,以腔体分隔的金属和高精度的温度控制模块屏蔽串扰、减小外界温度影响,实验测试了系统电路底噪、60 km光纤环路系统性能。测试结果表明:采用集成化的接入节点电路显著降低了系统电路底噪和1 m光纤传递底噪,在60 km光纤环路的20 km/40 km、40 km/20 km处输出频率的相对稳定度均优于 $4 \times 10^{-14}/s$ 、 $2 \times 10^{-17}/day$,长期稳定度比采用分立器件实现的节点电路时优化约一个量级。

关键词:微波频率传递;载波抑制;优化;温度;电路底噪

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2022)01-0025-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.01.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Optimization of the optical fiber radio frequency transfer system based on double-sideband with carrier suppression

KONG Mengya, HU Liang, CHEN Jianping, WU Guiling*

(State Key Lab of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Aiming at the defects of passive compensation optical fiber loop radio frequency transfer scheme using discrete devices to realize double-sideband with carrier suppression (DSBCS) modulation, the stability optimization design and test verification of optical fiber loop radio frequency transmission system based on DSBCS modulation are carried out. An integrated access node circuit based on radio chip is designed to shield crosstalk and reduce the influence of external temperature with cavity separated metal and high-precision temperature control module. The system circuit bottom noise and 60 km optical fiber loop system performance are tested. The test results show that the integrated access node circuit significantly reduces the system circuit bottom noise and 1 m optical fiber transmission bottom noise. The relative stability of the output frequency at 20 km/40 km and 40 km/20 km of 60 km optical fiber loop is better than $4 \times 10^{-14}/s$ and $2 \times 10^{-17}/day$. The long-term stability is about one order of magnitude better than that when the node circuit is realized by separate devices.

Key words: radio frequency transfer, carrier suppression, optimize, temperature, circuit floor noise

0 引言

高稳定的微波频率传递在频率标准播发^[1]、射电

收稿日期:2020-12-25。

基金项目:国家自然科学基金项目(61627817)资助。

作者简介:孔梦雅(1994—),女,硕士研究生,就读于上海交通大学电子科学与技术专业,主要从事高精度光纤微波频率传递技术的研究工作,参与了国家重点基金项目研究,负责了基于载波抑制双边带调制的光纤环路微波频率传递系统的稳定性的优化设计项目。

*通信作者:吴龟灵(1971—),男,博士,教授,主要从事光子信息处理与光学时间频率传递方向的研究工作。



天文^[2]和雷达等领域有着广泛的应用需求。光纤微波频率传递以其高带宽、高稳定、低损耗和不易受电磁干扰等优势受到广泛关注。在传递光纤微波频率时,人们主要采用主动^[3-4]和被动补偿相位噪声的方案^[2,5-9]来抑制由温度波动和光纤机械振动引起的相位噪声。与主动相位噪声补偿方案相比,被动相位噪声补偿方案采用混频技术可获得更快的补偿速度。在被动补偿相位噪声方案中,基于不同频率、相同波长(DFSW)^[6-8]的双向传输方案能有效抑制后向散射噪声的影响,并且保证双向光纤链路的对称性,获得更好的短期和长期传递稳定性。SHI P Y等人^[9]提出了一种基于载波抑

制双边带(DSBCS)调制的被动补偿光纤环路微波频率传递方案,利用 DSBCS 信号和探测信号实现双向 DF-SW 传输,能更有效地抑制后向散射信号的自拍频和后向散射信号与传输信号之间互拍频的影响,并与现有光网络中广泛采用的环形物理拓扑结构兼容。但是,该方案包含有多级混频、放大等微波电路处理,采用商用的分立器件实现,电路损耗大、易受温度等外界环境因素影响,导致电路优化受限,系统电路底噪难以提升^[2,10]。此外,分立器件实现的系统成本高,体积大,环境适应性差。

本文对基于 DSBCS 调制的光纤环路微波频率传递系统进行优化设计,用微波芯片取代分立器件,优化设计一体化的接入节点电路;采用腔体分隔的金属屏蔽盒和精确的温度控制技术,减少信号串扰,提高稳定性。

1 基于 DSBCS 调制的光纤环路微波频率传递原理

基于 DSBCS 调制的光纤环路微波传递方案如图 1 所示。在中心端被传递的微波信号为:

$$E_1 \propto \cos(2\omega_s t + 2\varphi_s) \quad (1)$$

其中, ω_s 是待传输的微波信号的频率, φ_s 是信号的初始频率, E_1 二分频后作为探测信号 E_2 被调制到偏置在 $V_\pi/2$ 的 IM1 上, 输出沿顺时针方向传递的光信号

$E_{opt1}^{[6]}$ 为:

$$E_{opt1} \propto \exp(j\omega_c t) [a_1 + b_1 \cos(\omega_s t + \varphi_s) + c_1 \cos(2\omega_s t + \varphi_s) + H_1] \quad (2)$$

其中, ω_c 是激光器产生的光载波的频率, a_1 、 b_1 和 c_1 是与调制器参数有关的常数系数, H_1 是信号中的高次谐波。

返回的探测信号经 DSB 发生器和 CP 处理器产生带有 CP 补偿的 DSB 信号, 通过偏置在 V_π 的调制器 IM2 调制到同一激光器输出的同一光载波上, 输出沿逆时针方向传递的 DSBCS 光信号 $E_{opt2}^{[6]}$ 的表达式为:

$$E_{opt2} \propto \exp(j\omega_c t) \times \{a_2 + \cos[(\omega_s - \omega_0)t + \omega_s \tau_1 + (\varphi_s - \varphi_0)] + a_2 + \cos[(\omega_s + \omega_0)t + \omega_s \tau_1 + (\varphi_s + \varphi_0)] + H_2\} \quad (3)$$

其中, τ_1 为信号沿光纤环的总传输时间, a_2 为传输后有衰减的系数, φ_0 为本地振荡信号的初始相位, H_2 为高阶分量。在光纤环路的任意接入节点节点, 通过 2×2 的光耦合器将顺时针、逆时针传输的光信号分路, 经过接入节点电路的二分频和 DFM, 最终混频恢复出被传递的微波信号 $E_{RRS}^{[6]}$ 为:

$$E_{RRS} \propto \cos(2\omega_s t + 2\varphi_s) \quad (4)$$

2 系统优化设计

图 2 为基于 DSBCS 调制的 2 GHz 频率传递系统优化结构图。在中心端, 待传递的 2 GHz 的信号均分为 2 路: 一路进入二分频产生 1 GHz 探测信号, 探测信号经偏置在 $V_\pi/2$ 的 IM1 加载到光载波上, 沿光纤环

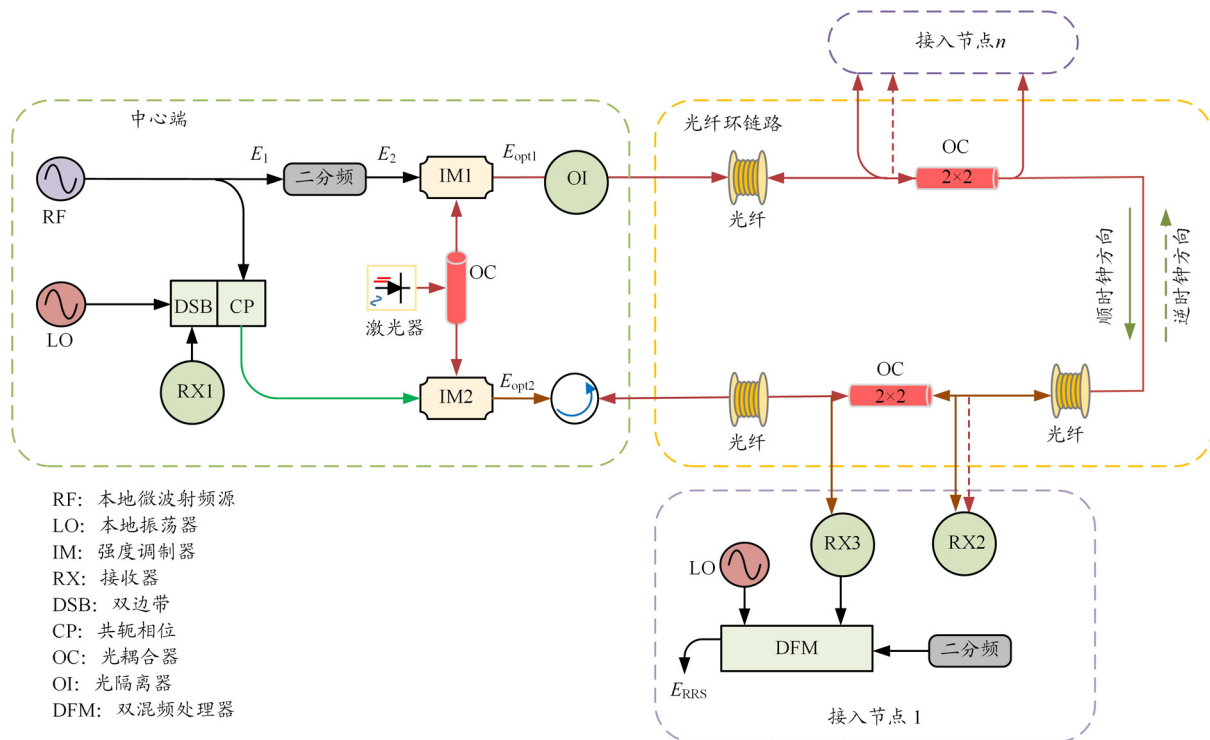


图 1 基于 DSBCS 调制的光纤环路微波传递方案示意图

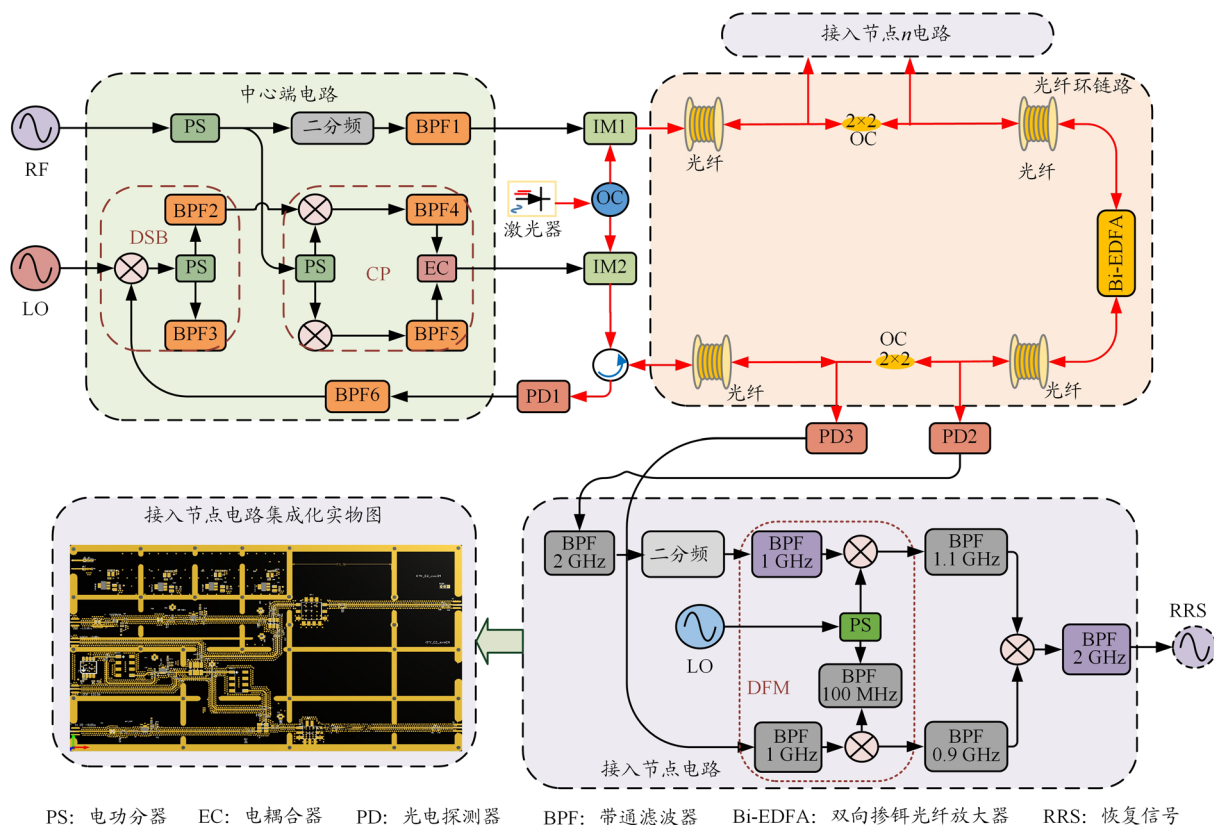


图2 基于DSBCS调制的2GHz频率传递系统优化结构图

路顺时针传输并返回中心端；返回的1 GHz探测信号与100 MHz LO信号混频得到1.1 GHz和0.9 GHz信号，它们与另一路待传递的2 GHz信号进入CP处理器得到带有CP补偿的0.9 GHz和1.1 GHz DSB信号。DSB信号经偏置在 V_{π} 的IM2加载到同一光载波上，沿逆时针方向传输。在光纤环路的任意接入节点，可以分别从逆时针和顺时针方向探测得到2 GHz和1 GHz信号。2路信号经接入节点电路进行分频、混频、滤波、放大和再混频处理，恢复出2 GHz的微波信号。

为了克服采用分立器件存在的不足，本文采用商用微波芯片，将接入节点电路中的电源、LO、二分频处理器、放大器和DFM等集成在一块电路板上，并对微波链路的增益、噪声、隔离度和信号完整性等进行优化设计。制作实现的集成电路板置于腔体分隔的屏蔽盒内，并进行温度控制。温度控制由主控模块、传感器输入模块和温度调节模块组成，结构如图3所示。传感器输入模块使用高灵敏度的温度传感器将温度转换为电流，反馈输入到主控模块；主控模块根据传感器输入，通过温控芯片对温度调节模块进行高精度控制；温度调节模块采用半导体制冷片（TEC）；TEC在正负电压控制下可迅速降温、升温，比加热膜和水冷板更灵敏，功耗更低。在设定稳定温度为环境温度的 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以

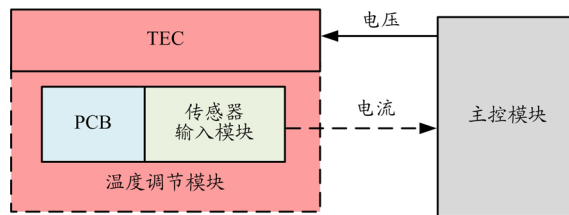


图3 接入节点电路的温度控制结构

内时，集成化接入节点电路能在300 s内达到设定温度并长期保持稳定，温度波动小于 0.02°C 。

3 实验测试与分析

图4为电路底噪测试示意图。将中心端电路输入的2 GHz信号和接入节点电路输出的2 GHz信号下变频到10 MHz，进入相位频率噪声测试仪器TSC5120进行测试。图5为接入节点采用集成电路（优化电路）、分立器件电路时的相位噪声和频率稳定度阿伦方差曲线图。图5(a)中，采用分立器件实现的系统电路底噪在 $10^{-2}\sim 10^{-3}$ Hz频偏处的噪声凸起是电路中有源器件的增益和非线性随温度的变化引起的^[2,10]。从图5(b)可以看出，采用优化电路时，系统电路底噪的短期稳定性（1~100 s）比采用分立器件实现时提升近半个量级，频率传递稳定度可达到 $3\times 10^{-15}/\text{s}$ 、

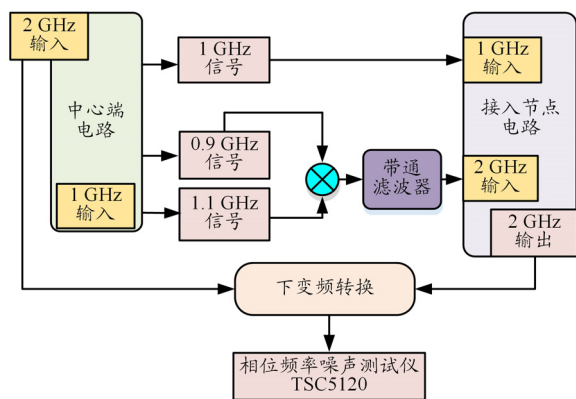
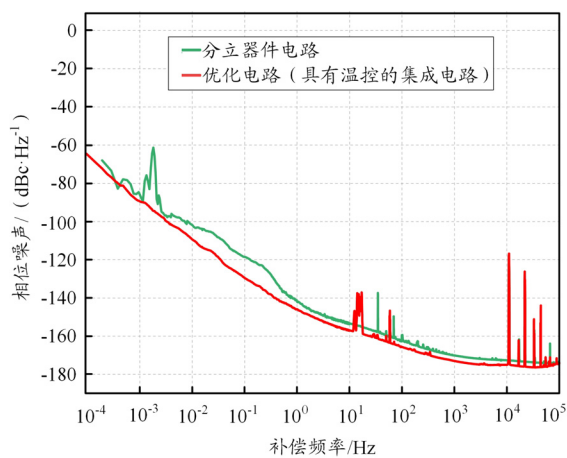
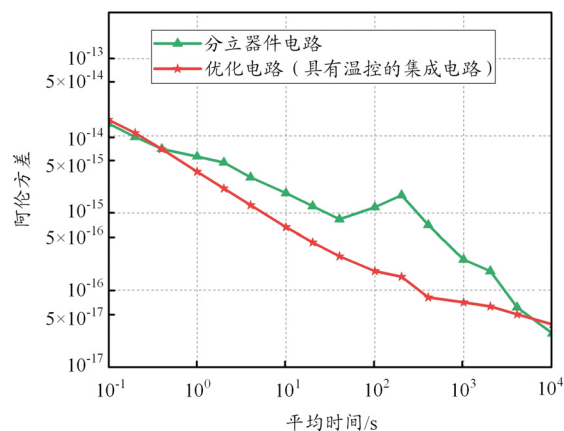


图4 电路底噪测试示意图



(a) 相位噪声和



(b) 频率稳定度阿伦方差

图5 电路底噪测试对比图

$5 \times 10^{-17}/10000$ s。

图6为60 km光纤环路微波频率传递实验系统实物图。60 km光纤环路由3个20 km标准单模光纤(SMF)和相应的色散补偿光纤(DCF)组成,放置在温度波动约5℃的实验室内。在距离中心端20 km(用20 km/40 km表示)和40 km(用40 km/20 km表示)处放置采用优化电路的接入节点机进行测试。中心端的

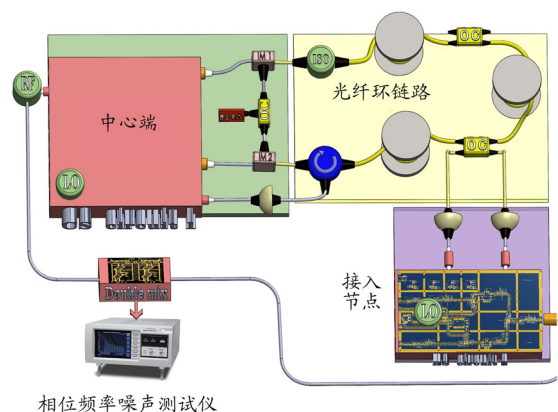
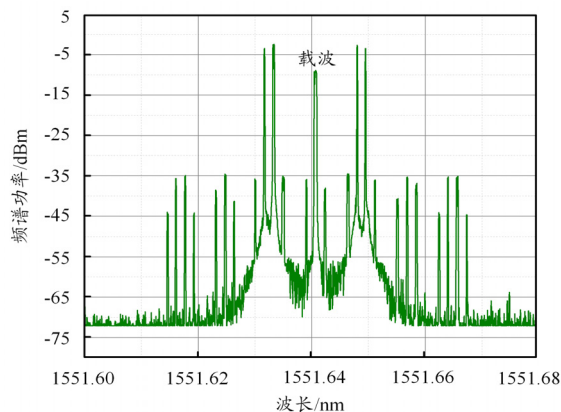


图6 60 km 光纤环路微波频率传递实验系统实物图

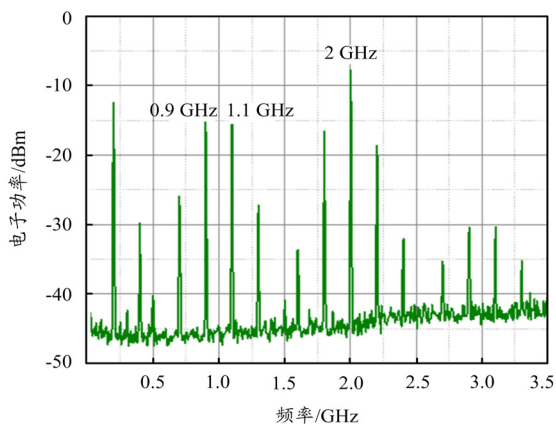
激光器波长采用1551.720 nm,通过马赫-曾德尔调制器(MZM)将微波信号加载到光载波上。中心端和接入节点中采用的光电探测器(PD)带宽均为2.5 GHz。

图7(a)为40 km/20 km接入节点DSBCS光信号的光谱。可以看出,光载波功率被抑制到双边带信号以下,偶数阶边带功率也较小。未完全抑制的光载波和偶数阶边带是由MZM自身受限的消光比和手动调节偏置电压的偏差造成的。图7(b)为光信号经PD探测得到的电信号频谱。可以看出,较大功率2 GHz电信号能被探测出来,它是由一阶双边带互拍频得到的。而残留的光载波、二阶双边带信号分别与一阶双边带信号拍频会产生0.9 GHz、1.1 GHz电信号,接入节点优化电路中的2 GHz带通滤波器可消除这部分电信号的影响。

本文对60 km光纤环路是否采用温控进行了测试对比研究,其相位噪声和频率稳定度阿伦方差图如图8所示。测试结果表明:与文献[6]采用分立器件实现的1 m光纤传递的频稳定度为 $4.6 \times 10^{-14}/s$ 相比,本文采用集成化电路实现的1 m光纤传递的频率稳定度优于 $1 \times 10^{-14}/s$ 、 $3 \times 10^{-17}/10000$ s,提升了近半个量级;

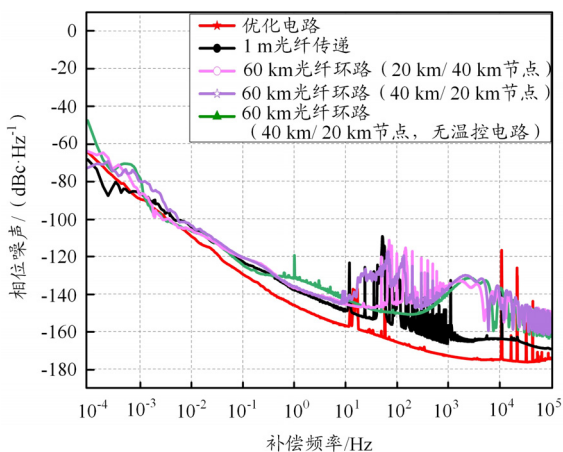


(a) 光谱图

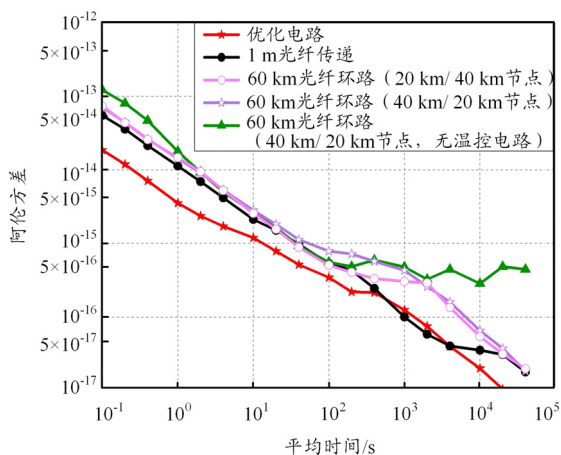


(b) 拍频后电信号频谱图

图7 40 km/20 km 接入节点 DSBSC 光信号的光谱图和拍频后电信号频谱图



(a) 相位噪声



(b) 频率稳定度阿伦方差

图8 60 km 光纤环路频率传递的相位噪声和稳定度阿伦方差图

在 60 km 环上 20 km/40 km、40 km/20 km 处输出频率的相对稳定度均优于 $4 \times 10^{-14}/s$ 、 $2 \times 10^{-17}/day$, 长期稳定度接近 1 m 光纤传递底噪的频率稳定度, 比在 40 km/20 km 处采用由分立器件实现的无温控接入节点时的频率传递稳定度 $5 \times 10^{-16}/day$ 提升约一个量级。

4 结束语

本文优化并测试验证了基于 DSBSC 调制的光纤环路微波频率传递系统。通过基于微波芯片的一体化接入节点电路, 结合高精度温控模块对系统进行优化。实验结果表明: 采用集成化的接入节点电路, 显著降低了系统电路底噪、系统 1 m 光纤传递底噪, 在 60 km 光纤环路上多接入节点微波频率传递的相对频率稳定度均优于 $4 \times 10^{-14}/s$ 、 $2 \times 10^{-17}/day$ 。

参考文献:

- [1] RIEHLE F. Optical clock networks[J]. Nature Photonics, 2017, 11(1): 25–31.
- [2] HE Y B, BALDWIN K G H, ORR B J, et al. Long-distance telecom-fiber transfer of a radio-frequency reference for radio astronomy[J]. Optical, 2018, 5(2): 138–146.
- [3] ZHANG J, WU G, LIN T, et al. Fiber-optic radio frequency transfer based on active phase noise compensation using a carrier suppressed double-sideband signal[J]. Optics Letters, 2017, 42(23): 5042–5045.
- [4] 赵粹臣, 赵文宇, 薛文祥, 等. 基于光学时延补偿的 50 km 光纤微波频率传递[J]. 光子学报, 2020, 49(8): 39–45.
- [5] LI H, WU G, ZHANG J, et al. Multi-access fiber-optic radio frequency transfer with passive phase noise compensation[J]. Optics Letters, 2016, 41(24): 5672–5675.
- [6] SHI P Y, WU G L, HU L, et al. Stable RF transfer over a fiber-optic ring with DSBSC modulation and a DSB RF signal [J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(2): 020633-1–020633-5.
- [7] CUI Y J, JIANG T W, YU S, et al. Passive-compensation-based stable RF phase dissemination for multiaccess trunk fiber link with anti-GVD and anti-backscattering function[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(5): 1–9.
- [8] BAI Y, WANG B, GAO C, et al. Fiber-based radio frequency dissemination for branching networks with passive phase-noise cancelation[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(6): 61201–61204.
- [9] 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): 58–64.
- [10] 陈文豪. 电子元器件低频电噪声测试技术及应用研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.