

引用本文:翟文胜,辛运霞,李兴旺,等.相位噪声消除的雷达信号长距离光纤链路稳定传输[J].光通信技术,2025,49(5):63-66.

相位噪声消除的雷达信号长距离光纤链路稳定传输

翟文胜¹,辛运霞^{1*},李兴旺^{2*},翟秀丽³,朱安福¹,李亚萍¹,陈黎霞¹,关娜¹,阎宽⁴,李新⁴

(1.华北水利水电大学 河南高校重点实验室,郑州 450046;2.河南理工大学,河南 焦作 454150;

3.新乡职业技术学院 河南高校工程实验室,河南 新乡 453003;4.北京邮电大学 信息光子学与光通信国家重点实验室,北京 100876)

摘要:相控阵雷达系统以实现大瞬时带宽、强抗干扰能力、高精度及灵活分布为核心目标,而信号相位稳定度是评估其精度的关键指标。为确保信号在长距离传输中的相位稳定性,提出一种相位噪声消除的雷达信号长距离光纤链路稳定传输方法,通过负反馈相位补偿方法有效抑制与消除相位噪声,从而在远端节点获得高稳定信号输出。实验结果表明:在200 km单模光纤链路中,所提方法支持10~20 GHz信号带宽,并能实现360°相移;在平均1 000 s的测试时间内,系统艾伦方差低至约 7.65×10^{-17} ,均方根抖动延时小于0.39 ps。

关键词:微波光子学;光纤链路;反馈补偿;相位噪声消除;精度

中图分类号:TN92 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)05-0063-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.05.011

Stable transmission of radar signal over long distance optical fiber link with phase noise cancellation

ZHAI Wensheng¹, XIN Yunxia^{1*}, LI Xingwang^{2*}, ZHAI Xiuli³

ZHU Anfu¹, LI Yaping¹, CHEN Lixia¹, GUAN Na¹, YAN Kuan⁴, LI Xin⁴

(1. Key Laboratory of Henan University, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;

2. Henan University of Technology, Jiaozuo Henan 454150, China; 3. Engineering Laboratory of Henan University, Xinxiang

Vocational and Technical College, Xinxiang Henan 453003, China; 4. State Key Laboratory of Information Photonics and

Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Phased array radar systems are designed with the core objectives of achieving large instantaneous bandwidth, robust anti-jamming capabilities, high precision, and flexible distribution, among which signal phase stability serves as a key metric for evaluating their accuracy. To ensure phase stability during long-distance signal transmission, a phase-stable transmission method for radar signals over long-haul fiber links with phase noise cancellation is proposed. This method effectively suppresses and eliminates phase noise through a negative feedback phase compensation technique, thereby enabling high-stability signal output at the remote node. Experimental results demonstrate that, over a 200 km single-mode fiber link, the proposed method supports a signal bandwidth of 10~20 GHz and achieves a 360° phase shift. Within an average measurement time of 1 000 seconds, the system Allan deviation is as low as approximately 7.65×10^{-17} , with a root-mean-square jitter delay of less than 0.39 ps.

Key words: microwave photonics, optical fiber link, feedback compensation, phase noise cancellation, accuracy

收稿日期:2025-03-12。

基金项目:河南省自然科学基金面上项目(242300420288)资助;河南省高校重点科研项目(13B510401)资助。

作者简介:翟文胜(1979—),男,汉族,河南省商丘人,博士,副教授,主要研究方向为微波光子雷达通信、光子信号处理。负责完成和参与的省部级、国家级项目共3项;获省部级科技成果奖2项。

***通信作者 1:**辛运霞(1982—),女,汉族,硕士,副教授,主要研究方向为无线光网络与智能信息处理技术。

***通信作者 2:**李兴旺(1980—)男,汉族,博士,教授,主要研究方向为认知频谱处理与智能频谱处理技术。



0 引言

射频信号的远距离稳定可靠传输在星际通信、雷达交叉探测与物理量测量等诸多领域引起了科学家们的广泛关注^[1-4]。随着通信技术快速发展,光纤链路具备了带宽大、重量轻和抗干扰等天然优势^[5-7]。信号在远距离光纤链路传输过程中,外围温度变化和机械应力极易对光纤造成噪声干扰,致使噪声积累导致信号相位漂移,进而影响系统长期稳定性。目前,关于利用光纤实现信号远距离稳定传输的方案已有大量

文献报道。例如,文献[8]提出了一种基于半导体光放大器交叉增益调制和交叉偏振调制的全光上变频技术方案^[8],该方案通过采用全光上变频降低干扰。在无源系统中使得量化噪声被限制在尽可能小的范围内,进而提升信号在光纤链路中传输稳定性^[9]。另一方面,基于分频滤波的无源相位噪声补偿技术也可有效抑制信号相位漂移,改善传输质量^[10],此类方法通过分频滤波处理提升信号稳定性,在光纤射频传输中表现出良好性能。此外,相位漂移消除技术还有多种实现途径,包括干涉相位图局部自适应滤波方法^[11],分频滤波无源相位噪声补偿的光纤射频传输技术^[12],卡尔曼滤波相位噪声估计技术^[13],感知提升的语音增强降噪算法^[14],萨格纳克环路法^[15]。通过现有研究可知,利用相位噪声抑制技术提升雷达探测精度一直是该领域研究人员关注的重点。在此基础上,如何实现信号远距离、长期稳定传输,已成为相控阵雷达系统升级中亟需解决的关键问题之一。为此,本文提出一种相位噪声消除的雷达信号长距离光纤链路稳定传输方法,旨在提升传输过程的稳定性和可靠性。

1 系统结构与原理分析

长距离光纤链路信号传输示意图如图1所示。系统器件主要包括可调谐激光源(TLS)、双驱动马赫-曾德尔(DD-MZM)调制器、线性啁啾光纤布喇格光栅(LCFBG)、相位调制器(PM)、光电探测器(PD)、混频器(MIX)、电带通滤波器(EBPF)和光耦合器(OC)等器件。

系统原理如下:光信号经DD-MZM调制器被射频信号完成单边带调制,调制信号经过1:1的OC分成2路。上边路经过光带通滤波器(OBPF)滤除边带,保留光载波;下边路经过OBPF滤除载波,保留上边带。上边路中,载波经过LCFBG实现相移处理,由于光载

波本身不携带信息信号,仅作为相位参考,可有效降低系统噪声干扰;下边路则允许上边带信号顺利通过。随后,载波和边带经OC耦合,通过200 km光纤传到远端节点,一部分经PD完成转换,另一部分光被反射回中心节点。经反射镜反射的光,通过环形器输入给PD₂,经PD₂转换为电信号;PM输出的光经PD₃同样转换为电信号;PD₂输出信号与PD₃输出信号通过MIX实现电域的混频,再经EBPF得到传输200 km后的信号相位信息。因送给PD₂的光信号经过2次200 km的传输(往返传输),故滤波器输出的是2倍的传输相位信息。经过滤波,保留有相位漂移的信号经放大驱动PM完成相位的补偿,以此在理论上完成噪声消除。实验中,采用单边带(SSB)调制,DD-MZM调制器消光比达到约20 dB。单边带调制信号表示为

$$E(t) = \sqrt{\rho} E_{in} [J_0(\beta_{RF}) e^{j(\omega_c t + \varphi_c)} + J_1(\beta_{RF}) e^{j(\omega_c + \omega_m)t + \varphi_m}] \quad (1)$$

其中, ρ 为调制系数, t 为时间参数, E_{in} 为射频信号振幅, $\beta_{RF} = \pi V_{RF}/V_{\pi}$ 为调制器调制指数(V_{RF} 为信号振幅, V_{π} 为半波电压), φ_c 和 φ_m 分别为光载波和边带初始相位, $J_m(x)$ 为第一类 m th阶贝塞尔函数系数, ω_c 、 $\omega_c + \omega_m$ 、 ω_m 依次为光载波、边带和射频信号的角频率。

不同波长光载波经LCFBG处理信号获得不同相移,信号可以写成

$$E_{LCFBG}(t) = \sqrt{\rho} E_{in} J_0(\beta_{RF}) e^{j(\omega_c t + \varphi_c - \Delta\varphi)} \quad (2)$$

其中, $\Delta\varphi$ 为光载波相移增量。小信号情况下,高阶边带小信号分配能量较小,在式(1)中被忽略, $J_0(\beta_{RF})$ 和 $J_2(\beta_{RF})$ 分别接近1和 $\beta_{RF}^2/2$ 。相位调制器输出信号表示为

$$E_{PM}(t) = \sqrt{\rho} E_{in} J_0(\beta_{RF}) e^{j(\omega_c t + \varphi_c - \Delta\varphi - \varphi_{com})} \quad (3)$$

一部分信号发射到PD₃中,另一部分通过长距离光纤链路传输到远端节点。在远端节点,PD₁完成光/

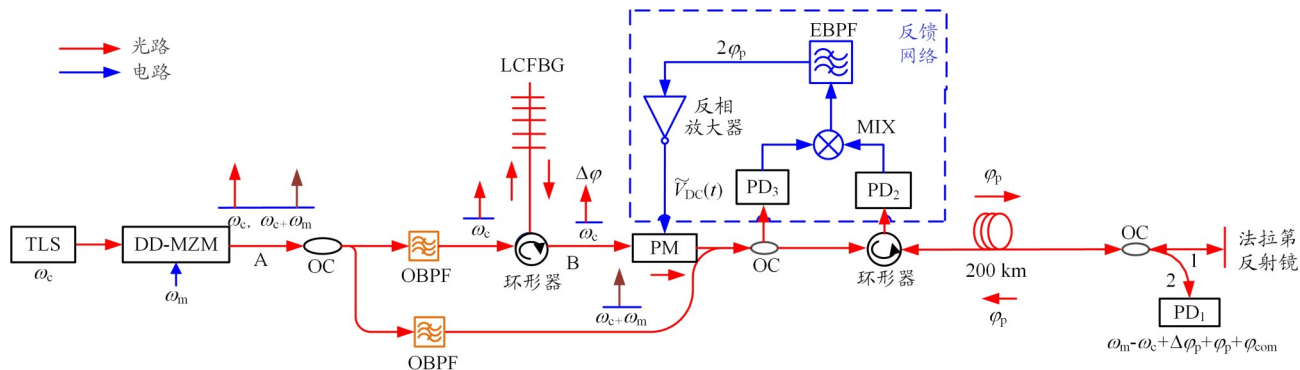


图1 长距离光纤链路信号传输示意图

电转换, 恢复出原来的射频信号, 射频信号表示为

$$I_1(t) = R\rho P_{in}\beta_{RF} \times \left[\cos(\omega_m t + \varphi_m - \varphi_c + \Delta\varphi + \varphi_p + \varphi_{com}) \right] \quad (4)$$

其中, R 为 PD 响应度, P_{in} 为光功率, φ_p 为光纤链路传输引起的相位增量, $\varphi_{com} = \pi \tilde{V}_{DC}(t)/V_\pi$ 为相位补偿函数。

PD₃ 输出信号可写为

$$I_3(t) \propto \cos(\omega_m t + \varphi_m - \varphi_c + \Delta\varphi + \varphi_{com}) \quad (5)$$

在远端节点, 法拉第反射镜把部分光信号经反射回中心节点, PD₂ 输出信号可写为

$$I_2(t) \propto \cos(\omega_m t + \varphi_m - \varphi_c + \Delta\varphi + 2\varphi_p + \varphi_{com}) \quad (6)$$

信号 I_2 和 I_3 经由 MIX 和 EBPf 处理后, 信号 $\cos(2\varphi_p)$ 由反相放大器处理, 相位误差信号 φ_{error} 可以写为

$$\varphi_{error} = 2\varphi_p + \varphi_{com} \quad (7)$$

当 $\varphi_{error}=0$ 时, $2\varphi_p = -\varphi_{com}$, 相位噪声被抵消, 在远端节点获得稳定频率信号, 系统保持稳定运行。

2 实验结果分析

依据原理可知, TLS(TLS100D) 输出光载波被注入到 DD-MZM 调制器 (FTM7921ER) 中, 调制器啁啾因子绝对值小于 0.15, 插入损耗约为 5 dB。因光载波不携带有用信息, 仅光载波由线性啁啾布喇格光纤光栅延时处理, 从而降低了噪声干扰, 减少信号能量外泄损失。在远程节点, 分光比为 70:30 的 OC 将 30% 光功率投射入 PD₁ (Optilab, LR-30), 而另一部分被法拉第反射镜反射回中心节点。

为了克服远程光纤链路中色散引起射频功率衰落, 实验中采用单边带调制。高分辨率光谱分析仪 (横河电机, AQ6370B) 测得的单边带调制光谱如图 2 所示。为获得最佳信噪比, 需合理调整边带与光载波之间的功率分配比例。当光载波功率约为 0 dBm 时, 边带功率为 -12.5 dBm。调整合适的载边比从而提升

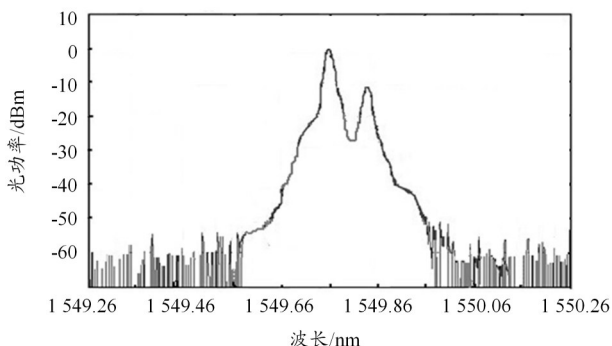


图2 单边带调制光信号光谱

信噪比, 为此有利于远端节点信号的恢复。

使用矢量网络分析仪 (安捷伦, 8722ES) 对信号功率及相移变化进行测试, 结果如图 3 所示。通过将光相位调制器的偏置电压在 -12~12 V 内调节, 可实现信号的连续线性调相, 随波长变化时, 其功率波动小于 0.56 dB, 同时获得约 360° 的相移量。测试结果表明, 该光纤链路环路的调谐带宽大于 10 MHz, 满足相位消除方案的性能要求。

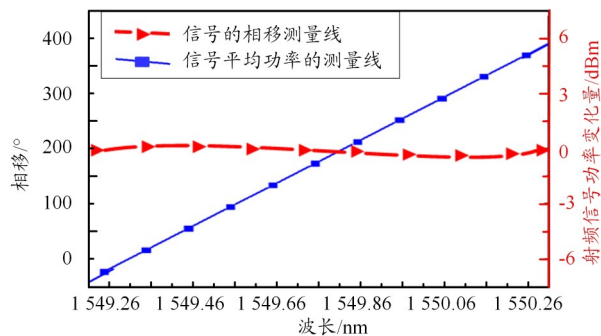


图3 远端节点信号相移和功率测量

信号相位抖动参数可以评估系统稳定程度。有无反馈信号处理下抖动测量波形如图 4 所示。可以看出, 在 7 500 s 的测试时间内, 无相位补偿 (无反馈) 时相位漂移约为 230 ps; 而在有反馈相位补偿时, 相位抖动被抑制到小于 0.39 ps。结果表明, 反馈补偿处理可显著增强系统的稳定性。

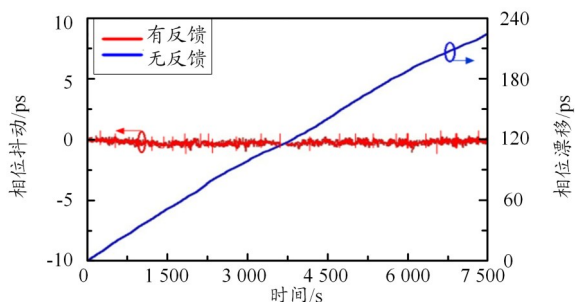


图4 相位抖动波形测量

在频域中, 相位噪声谱反映了相位噪声的抑制程度。实验中, 采用相位噪声分析仪 (RONO.2688/2012) 对链路相位噪声谱进行了测量, 结果如图 5 所示。可以看出, 在 10~1 000 Hz 的频率偏移范围内, 无反馈情况下的相位噪声值最小约 -110.5 dBc/Hz。在相同频率偏移范围内, 有反馈情况下的相位噪声值最小约 -122.5 dBc/Hz。从实验结果可以得出, 当采用反馈技术时, 载波附近相位噪声 (快速波动) 能够被有效地抑制。

翟文胜, 辛运霞, 李兴旺, 等: 相位噪声消除的雷达信号长距离光纤链路稳定传输

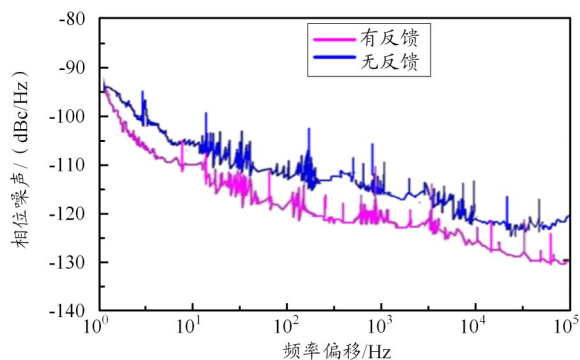


图5 相位噪声谱测量图

为评估系统的长期稳定性,本文基于时域艾伦方差进行了分析。实验过程中,通过合理选取采样点长度,利用频率计数分析仪(安捷伦,53230A)记录测量值,并采用艾伦方差方程计算相邻区间均值的方差平均值,结果如图6所示。在平均时间为10 s内,无反馈补偿的艾伦方差平均值约为 1.96×10^{-14} ,有反馈补偿的艾伦方差平均值约为 5.36×10^{-15} ;在1 000 s内时,无反馈平均值约为 5.12×10^{-14} ;在1 000 s内时,其平均值约为 7.65×10^{-17} 。通过对比分析可知,采用有反馈处理方案系统动态稳定性得到明显改善。

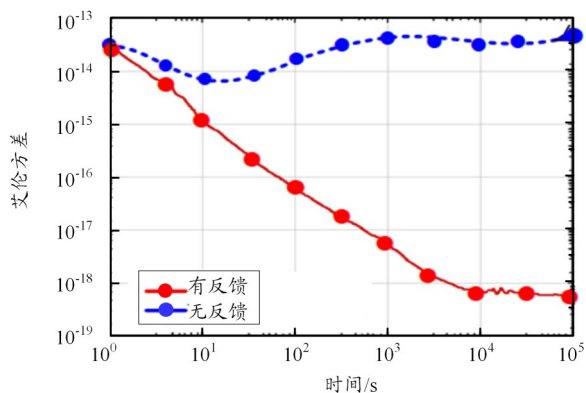


图6 时域艾伦偏差测量结果

3 结束语

本文提出了一种基于相位噪声消除的雷达信号长距离光纤链路稳定传输方法,通过负反馈机制有效抑制了相位噪声。该方法利用光载波不携带信号的特点,采用LCFGB仅对光载波进行延时与相移调控,从而显著提升频率稳定性与雷达波束指向精度。同时,系统带宽得以扩展,抗干扰能力和分辨率也获得增强,为远距离、多通道、多节点雷达系统的发展提供了技术基础。实验结果表明,在200 km的单模光纤中

实现了10~20 GHz信号的 360° 相移,远端功率波动低于0.56 dB,均方根抖动小于0.39 ps。在1 000 s平均时间下,艾伦方差为 7.65×10^{-17} ,表明系统具备卓越的长期稳定性。

参考文献:

- [1] WENSHENG Z, JIANBIN Y, YUNXIA X, et al. Photonic generation of phase-coded microwave signal with tunabilities[C]//OSA. Proceedings of Asia Communications and Photonics Conference. Beijing: OSA, 2020 (10): 633-637.
- [2] SHILONG P, XINGWEI Y, YAMEI Z, et al. Microwave photonic array radars[J]. IEEE Journal of Microwaves, 2021, 1(1): 1324-1328.
- [3] 翟文胜, 许丽. 基于新型光子器件的高频宽带微波光子相移技术研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- [4] WENSHENG Z, JIANBIN Y, YUNXIA X, et al. Photonic generation of phase-coded microwave signal with tunabilities[C]//OSA. Proceedings of Asia Communications and Photonics Conference. Shanghai: OSA, 2021, 11: 752-755.
- [5] HRAIMEL B, ZHANG X P, PEI Y Q. Optical single-sideband modulation with tunable optical carrier to sideband ratio in radio over fiber systemset[J]. Lightwave Technology, 2011, 29: 775-781.
- [6] WEIFENG Z, JIANPING Y. Ultrawideband RF photonic phase shifter using two cascaded polarization modulators[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26: 911-915.
- [7] WEI L, WENTING W, WEN H S, et al. Stable radio-frequency phase distribution over optical fiber by phase-drift auto-cancellation[J]. Optics Letters, 2014, 39: 4294-4298.
- [8] LOPEZ O, AMY-KLEIN A, LOURS M, et al. High-resolution microwave frequency dissemination on an 86-km urban optical link[J]. Appl. Physics B, 2010, 48: 723-728.
- [9] NING B, HOU D, ZHENG T L, et al. Hybrid analog-digital fiber-based radio-frequency signal distribution[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25: 1551-1555.
- [10] SANCHEZ J, LLORET I, GASULLA S, et al. Fully tunable 360° microwave photonic phase shifter based on a single semiconductor optical-amplifier[J]. Optics Express, 2011, 19: 17421-17426.
- [11] 薛海伟, 冯大政. 一种新的干涉相位图局部自适应滤波方法[J]. 北京: 电子信息学报, 2016, 3(16): 3085-3091.
- [12] WILCOX R, BYRD J M, DOOLITTLE L, et al. Stable transmission of radio frequency signals on fiber links using interferometric delay sensing[J]. Optics Letters, 2009, 34: 3050-3054.
- [13] LUMIN Z, LE C, YI D, et al. Phase drift cancellation of remote radio frequency transfer using an optoelectronic delay-locked loop[J]. Optics Letters, 2011, 36: 873-877.
- [14] 王晶, 尹栋, 蒋涉权, 等. 基于参数估计和感知提升的语音增强降噪算法[J]. 北京: 电子信息学报, 2016, 3(1): 174-179.
- [15] WEI K, DARYOUSH A S. Self-Forced opto-electronic oscillators using Sagnac-loop PM-IM convertor[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(19): 5278-5285.