

基于微波光子信号稳相传输的多路信号增强技术

欧阳站, 谢仕锋, 王侠, 曾永福, 李跃, 尹思杰, 代丰羽, 杨万里, 尹怡辉

(中国电子科技集团公司 第三十四研究所, 广西 桂林 541004)

摘要: 针对信号在光纤中传输时受到外部环境因素影响, 导致传输的光载射频信号相位出现抖动, 影响多路信号相干叠加后的信噪比问题, 提出一种基于微波光子信号稳相传输的多路信号增强技术。通过设计包含相位测量、控制与调节模块的稳相传输系统, 结合闭环测量和精度调节(粗调 10 ps、精调 0.1 ps), 实现光载射频信号的相位稳定; 进一步搭建多路信号传输系统, 采用匹配滤波和相位精确合成方法, 完成 3 路信号的相干叠加。实验结果表明: 在 1.7、2.3 GHz 频率下, 叠加后的信号功率较单路信号分别提升 4.5、5.1 dB, 信噪比分别改善 2.8、3.44 dB。

关键词: 微波光子; 稳相传输; 多路信号; 信号增强

中图分类号: TN015 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2025)02-0081-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.02.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Multi-channel signal enhancement technology based on microwave photonic phase-stabilized transmission

OUYANG Hong, XIE Shifeng, WANG Xia, ZENG Yongfu,

LI Yue, YIN Sijie, DAI Fengyu, YANG Wanli, YIN Yihui

(The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: To address the phase jitter in optical-carried radio frequency signals caused by environmental factors during fiber transmission, which degrades the signal-to-noise ratio after multi-channel coherent superposition, this paper proposes a multi-channel signal enhancement technique based on microwave photonic phase-stabilized transmission. A phase-stabilized transmission system incorporating phase measurement, control, and adjustment modules is designed, achieving stable radio frequency signal phases through closed-loop measurement and precision regulation (10 ps coarse adjustment and 0.1 ps fine adjustment). A multi-channel transmission system is further constructed to realize coherent superposition of three signals using matched filtering and precise phase synthesis. The experimental results demonstrate power enhancements of 4.5 dB and 5.1 dBm at 1.7 GHz and 2.3 GHz respectively, with signal-to-noise ratio improvements of 2.8 dB and 3.44 dB compared to single-channel transmission.

Key words: microwave photonic, phase-stabilized transmission, multi-channel signals, signal enhancement

0 引言

随着电子信息技术和第五代移动通信(5G)系统的广泛部署, 人工智能、云计算和大数据技术得

收稿日期: 2024-09-07。

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2441250)资助; 广西科技计划项目(AD24010060)资助。

作者简介: 欧阳站(1979—), 男, 广西梧州人, 正高级工程师, 主要研究方向为光通信设备、光电子模块、组件研制开发和光电信号处理等。负责完成及在研的国家级、省部级项目 20 项, 获得国防科技进步二、三等奖各 1 次, 中国电科集团科技进步一、二、三等奖各 1 次。



到了深度融合^[1], 推动了数据、运营、信息与通信技术的协同发展。下一代 6G 网络技术将进一步利用通信信号对电磁环境进行感知, 包括检测、定位、识别和成像等功能, 从而提供更全面的服务。在此背景下, 多路信号合成技术作为实现目标的重要手段, 备受关注。相较于单路信号收发系统, 多路信号收发系统通过增加收发路径显著提升了平均信噪比^[2]。其中, 多路接收信号的相干叠加可使天线阵列输出功率随天线单元数量平方增长, 而噪声的非相干特性则使总接收信噪比线性增长, 从而有效提高接收信噪比和探测灵敏度^[3]。然而, 在光纤传输过程中, 外部环境因素(如温度和应力)会导致光纤的有效长度和折射率发生变

化,进而引起传输延时和相位扰动,导致光载射频信号的相位抖动^[4]。为解决这一问题,通常采用光纤延时线进行补偿^[5],从而确保远端输出信号与本地信号的相位一致性。通过将光纤延时补偿技术与微波光子收发处理技术有机结合,为多路信号叠加增强提供了切实可行的技术方案。

因此,本文提出一种基于微波光子信号稳相传输的多路信号增强技术,通过在光纤中稳定传输信号并保持其相位一致性,实现多路信号的有效增强。

1 微波光子稳相技术及信号增强原理

微波光子学是一门融合微波与光子学技术的交叉学科,其优势在于低损耗的射频光纤链路稳相传输、光波导真时延、宽带调制与解调链路以及高 Q 值光学谐振腔等^[6-10]特性。

光纤稳相技术的基本原理如图1所示。信号光源分为2路:一路作为参考信号输入相位比较模块,另一路经过光纤传输至远端,再将反馈信号 F 沿同一光纤回传至相位比较模块。相位比较模块通过对比参考信号与反馈信号,生成误差控制信号,并通过补偿控制信号 C 调节相位调节模块,抵消光纤链路引入的相位抖动,从而实现信号的稳相传输。

多路信号增强的核心在于将接收到的 N 路信号

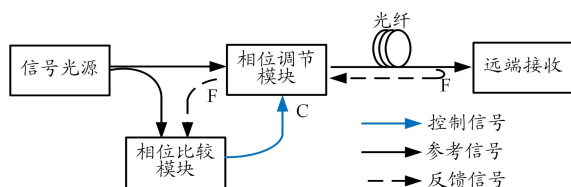


图1 光纤稳相技术工作原理图

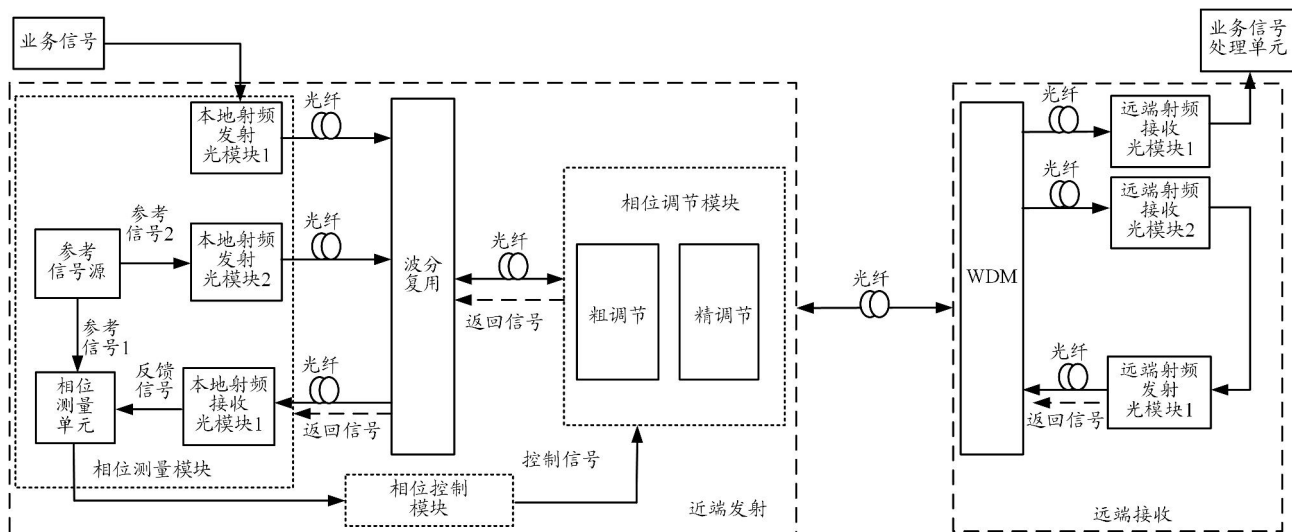


图2 信号相位稳定传输系统结构框图

进行匹配滤波处理,通过对每路信号的相位与延时进行精确合成,获得最大信噪比增益^[11]。设2路信号 $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 的波形分别为

$$S_1(t) = A_1 \cos[\omega t + \varphi_1] \quad (1)$$

$$S_2(t) = A_2 \cos[\omega t + \varphi_2] \quad (2)$$

其中, t 为时间, A_1 和 A_2 分别为2路信号的幅度, ω 为信号的频率, φ_1 和 φ_2 分别为2路信号的相位。2路信号叠加后的合路信号 $S_{12}(t)$ 为

$$S_{12}(t) = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\Delta\varphi)} \quad (3)$$

其中, $\Delta\varphi$ 为2路信号的相位差。

由式(3)可知,当2路信号的相位差为0时,叠加后的信号幅度为 $A_1 + A_2$;当2路信号的相位差为 π 时,叠加后的信号幅度为 $|A_1 - A_2|$ 。

对2路信号叠加情况进行仿真,验证相位差对信号叠加效果的影响。仿真结果表明:当2路信号的相位差接近0时,信号叠加后的信号值将变大,接近单路信号的2倍;当2路信号的相位差为 π 时,信号叠加后的信号值将变小,不超过单路信号幅值的2%(理论最小值为零)。

2 基于微波光子稳相的多路信号传输系统

2.1 相位稳定传输系统

本文设计了一套信号相位稳定传输系统,主要由相位测量、相位控制和相位调节模块组成,用于实现基准信号产生、信号相位比较、计算与调节功能。系统结构框图如图2所示。该相位调节模块采用粗-精2级调节架构:粗调单元、精调单元的调节精度分别10、0.1 ps,二者通过闭环反馈控制系统协同工作,可实

现较大范围内的相位精确调节。

相位测量模块包括参考信号源、射频发射光模块、射频接收光模块和相位测量单元。参考信号源生成参考信号,分为2路:一路作为相位参考信号输入相位测量单元,另一路通过射频发射光模块转换为光信号并与业务信号复用后传输。反馈信号经光纤往返传输后返回相位测量模块,用于测量传输时延和相位差。由于参考信号与业务信号共用同一段光纤,其路径长度完全一致,因此参考信号的传输时延为业务信号传输时延的2倍。

基于相位测量模块的计算结果,相位控制模块确定参考信号经光纤传输后的基准时延 T_0 。当光纤受环境应力扰动时,实时测量的时延与 T_0 的差值即为业务信号传输时延变化量 ΔT 。通过调节相位补偿模块的补偿参量,可消除环境因素引起的光程变化,从而维持业务信号传输相位的稳定性。

2.2 多路信号传输系统

基于上述信号相位稳定系统结构框图,本文搭建了一套多路信号传输系统,主要由信号接收天线、相位稳定系统、射频发射光模块和射频接收光模块组成,如图3所示。系统接收来自3路天线的信号,分别将其转换为光信号并通过相位稳定系统传输至信号处理终端。终端检测每路信号的相位,并通过控制信号调节相位稳定系统中各路信号的相位,最终实现3路信号的叠加,从而显著改善信号信噪比。

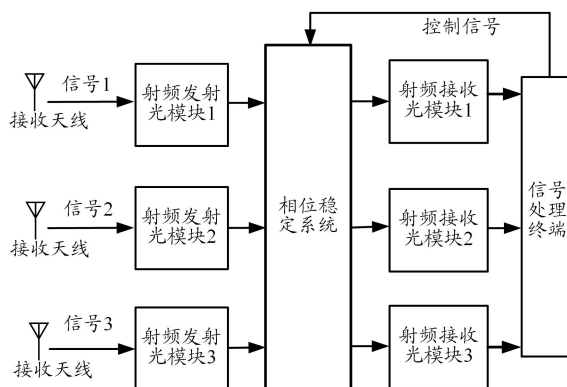
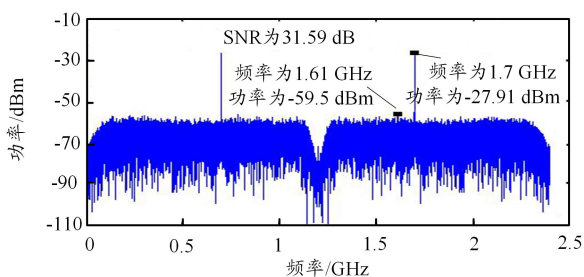


图3 多路信号传输系统

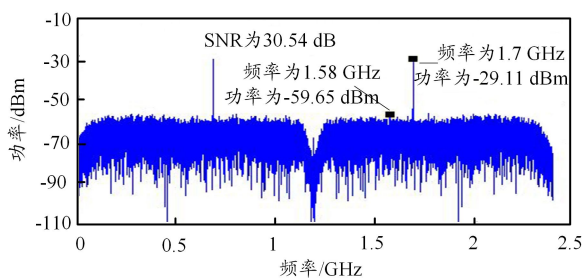
3 实验结果及分析

本文基于多路信号传输系统对所提增强技术开展实验验证,选取1.7 GHz和2.3 GHz这2种频率信号进行性能测试。实验测试结果如图4和图5所示:对于1.7 GHz信号,叠加前单路信号最高功率与信噪比分别为-20.71 dBm和37.16 dB,经信号叠加后提升至-16.21 dBm和39.96 dB,功率与信噪比分别增加了4.5、2.8 dB;在2.3 GHz频率下,信号叠加前最高功率和信噪比分别为-22.42 dBm与38.9 dB,叠加后分别达到-17.32 dBm和42.34 dB,对应增幅分别为5.1、3.44 dB。

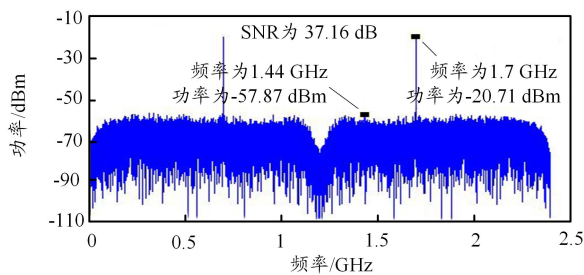
实验数据表明,不同频率信号的增强效果呈现差异性特征。经分析,该差异主要源于实验过程中3路



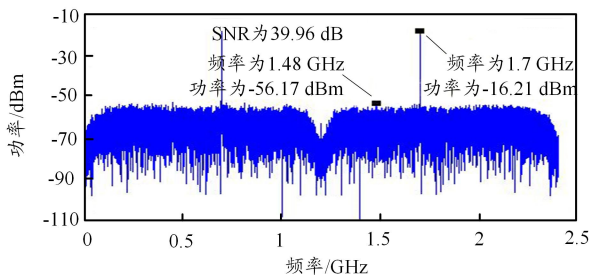
(a) 信号1频谱值



(b) 信号2频谱值



(c) 信号3频谱值



(d) 叠加后频谱值

图4 1.7 GHz信号频谱值

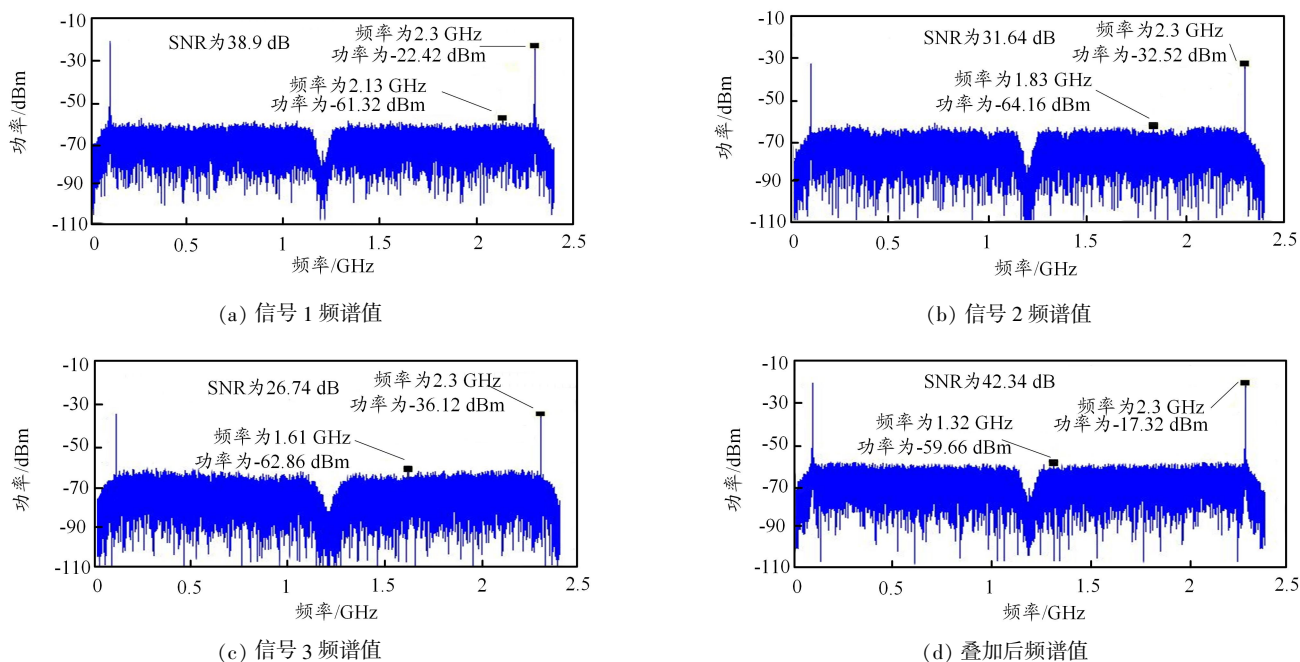


图 5 2.3 GHz 信号频谱值

信号间的相位调整误差,表明系统一致性仍需进一步优化提升。

4 结束语

本文提出了基于微波光子信号稳相传输的多路信号增强技术,设计并实现了一套多路信号传输系统,通过实验验证了该技术在 1.7、2.3 GHz 频率下的性能表现。实验结果表明,叠加后的信号功率分别提升了 4.5、5.1 dB,信噪比分别提升了 2.8、3.44 dB。这充分证明了多路信号增强技术在接收信号信噪比改善方面的有效性。未来研究将重点提升相位测量精度、加快相位调节速度及优化系统一致性,以完善多路信号增强技术。这项基于微波光子信号稳相传输的技术,在下一代通信及信号感知领域展现出良好的应用前景。

参考文献:

[1] 刘光毅,张慧敏,佟舟,等. 6G 移动信息网络架构:从通信到一切皆服务的变迁[J]. 中国科学,2024,54(5):1236-1266.

[2] PAULRAJ A, NABAR R, GORE D. Introduction to space-time wireless communications[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

[3] 刘燕都,王元钦,焦义文,等. 空间信息传输中的多天线技术综述[J]. 电讯技术,2020,60(3):350-357.

[4] 陈雨锋,王波. 光纤时间频率同步技术及应用[J]. 仪器仪表学报,2024,45(2):47-62.

[5] 刘友永,马文起,陈少卿,等. 光纤射频频稳相传输技术试验研究[J]. 深空探测学报,2018,5(2):182-187.

[6] DUARTE V C, DRUMMOND M V, NOGUERA R N, et al. Modular coherent photonic-aided payload receiver for communications satellites[J]. Nature Communication, 2019, 10(1): 77-80

[7] 王凯,张业斌,张方正,等. 跨带雷达微波光子技术:机遇与挑战[J]. 雷达科学与技术,2021,19(2):168-171.

[8] 张方正,潘时龙. 面向雷达应用的微波光子信号产生技术[J]. 数据采集与处理,2014,29(6):922-929.

[9] 田跃龙,刘治国. 微波光子雷达技术综述[J]. 数据采集与处理,2017,30(5):193-198.

[10] 王侠,余志强,欧阳站,等. 光电延时模块设计及实现[J]. 电子技术,2022,37(3):32-35.

[11] 周宝亮,雷子健,周东明,等. 分布式孔径相参雷达预警探测技术[J]. 信号处理,2018,34(11):1330-1338.