

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.240105.

光通信系统与网络技术

姚文杰, 陈均, 黄惠琳, 等. 基于FPGA的超高灵敏度收发机研究及实验验证[J]. 光通信研究, 2026(1): 240105.

Yao W J, Chen J, Huang H L, et al. Research and Experimental Verification of FPGA-based Ultra-High Sensitivity Transceivers[J]. Study on Optical Communications, 2026(1): 240105.

基于FPGA的超高灵敏度收发机研究及实验验证

姚文杰¹, 陈均¹, 黄惠琳¹, 沈俊奕¹, 段明雄², 吴剑军²

(1. 国网福建省电力有限公司信息通信分公司, 福州 350001; 2. 武汉光迅科技股份有限公司, 武汉 430205)

摘要:【目的】文章针对传统超长无中继通信系统中存在极高链路损耗,而导致传统收发机架构接收机灵敏度受限的问题,提出了一种基于现场可编程门阵列(FPGA)的超高灵敏度收发机方案,通过优化传统相干数字信号处理(DSP)算法,提出了无中继通信系统的实时通信方案。【方法】文章通过仿真建模分析了偏振复用正交相移键控(PDM-QPSK)信号在不同传输速率下的接收灵敏度,并利用4个远程增益单元(RGU)搭建了长达832.88 km的超长无中继通信系统,对实时传输进行了实验验证。【结果】仿真分析表明,优化后的超高灵敏度接收机在2.5 Gbit/s速率下的接收机灵敏度为-53.5 dBm,在625 Mbit/s速率下的接收机灵敏度为-59.3 dBm。成功完成了传输距离为832.88 km,传输速率为625 Mbit/s的PDM-QPSK实时无中继通信传输实验验证,其中G.654 E单模光纤的总传输损耗为121.2 dB。【结论】文章所提基于FPGA的相干收发架构能够在超低接收光功率下实现高灵敏度信号检测,并且通过将其与拉曼泵浦放大器与RGU相结合,可进一步延长超长无中继传输系统的传输距离。

关键词:现场可编程门阵列;无中继通信;实时通信;光纤光学;拉曼放大器;远程增益单元

中图分类号:TN929

文献标志码:A

Research and Experimental Verification of FPGA-based Ultra-High Sensitivity Transceivers

YAO Wenjie¹, CHEN Jun¹, HUANG Huilin¹, SHEN Junyi¹, DUAN Mingxiong², WU Jianjun²

(1. State Grid Fujian Information & Communication Company, Fuzhou 350001, China; 2. Accelink Technologies Co., Ltd., Wuhan 430205, China)

Abstract: 【Objective】The objective of this paper is to address the problem of extremely high link loss in traditional ultra-long unrepeatable communication systems with limited receiver sensitivity of traditional transceiver architectures. An ultra-high sensitivity Field Programmable Logic Gate Array (FPGA)-based transceiver scheme is proposed, and a real-time communication scheme for the unrepeatable communication system is proposed by optimizing the traditional coherent Digital Signal Processing (DSP) algorithm. 【Methods】The receiver sensitivity of Polarization-Division-Multiplexing Quadrature-Phase-Shift-Keying (PDM-QPSK) signal at different transmission rates is analyzed in simulation, and an ultra-long unrepeatable communication system of 832.88 km is constructed to experimentally validate the real-time transmission using four Remote Gain Units (RGU). 【Results】The simulation analysis shows that the ultra-high sensitivity receiver after optimization has a receiver sensitivity of -53.5 dBm at 2.5 Gbit/s and -59.3 dBm at 625 Mbit/s. The experimental verification of real-time unrepeatable transmission is successfully completed for the PDM-QPSK signal transmission over a distance of 832.88 km and a rate of 625 Mbit/s, where G.654 E fiber and RGUs are used in the transmission link. The total transmission loss of the G.654 E single-mode fibre is 121.2 dB. 【Conclusion】The proposed FPGA-based coherent transceiver architecture is capable of achieving high sensitivity signal detection at ultra-low received optical power. The transmission distance of the ultra-long unrepeatable transmission system can be further extended by combining it with Raman pump amplifiers and RGUs.

Key words: FPGA; unrepeatable transmission; real-time transmission; fiber optics; Raman amplifier; RGU

0 引言

超长无中继系统的开发是为了克服沙漠、海洋和其他环境恶劣地区人烟稀少所带来的网络和超高压交/直流电网维护的困难。无中继传输系统的目标是在通信链路系统中不使用有源元件的情况下增

加通信距离。在无中继链路中增加传输距离是一项相当大的挑战。近年来,由于超低损耗和大有效面积光纤的引入、拉曼放大器和掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA)功率的优化以及向远程增益单元(Remote Gain Unit, RGU)的增加,无中继光纤系统的传输距离已经大大增加,并且

收稿日期:2024-06-01; 修回日期:2024-06-21; 纸质出版日期:2026-02-10

基金项目:国网福建省电力有限公司资助项目(SGFJXT00DDJS2310155)

作者简介:姚文杰(1985-),女,福建福州人。高级工程师,硕士,主要研究方向为通信规划运维及光传输运维。

通信作者:吴剑军,硕士。E-mail: jianjun.wu@accelink.com

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

研究者进行了大量实验验证^[1-9]。

最近,在无中继光纤系统中增加RGU数量以增加传输距离成为主流实验方案,部分已有信号传输速率和其对应的传输实验成果如下:50 Gbit/s 二进制移相键控法(Binary Phase Shift Keying,BPSK)信号传输 670.64 km;100 Gbit/s 偏振复用正交相移键控(Polarization-Division-Multiplexing Quadrature Phase Shift Keying,PDM-QPSK)信号传输 653.35 km;200 Gbit/s 8阶正交振幅调制(8 Quadrature Amplitude Modulation,8QAM)信号传输 601.93 km;400 Gbit/s 64QAM 信号传输 502.13 km^[1];500 Gbit/s PDM-QPSK 传输 431 km^[2];2.5 Gbit/s PDM-QPSK 传输 606.5 km^[3];2.5 Gbit/s PDM-QPSK 传输 713.2 km^[4]。这些实验使用专用泵浦路径传输泵浦功率,不携带任何数据流量。为了增加传输距离,泵浦路径往往会提高到3~4路,因此减少泵浦路径和使用双光纤配置以降低成本仍是更

有吸引力的解决方案。

本文实现了单载波 625 Mbit/s 系统创纪录的 832.8 km 无中继传输距离。实验采用了两个前向RGU、两个后向RGU、前向和后向高性能高阶拉曼泵、自主研发的实时PDM-QPSK超高灵敏度收发机和超低损耗大有效面积G.654 E光纤。现有报道中此方案为单光纤配置下所实现的625 Mbit/s单跨无中继传输的最远距离。

1 高灵敏度收发机仿真设计

VPI光通信仿真软件中信号发送端和接收端仿真结构分别如图1所示。发送端通过偏振分束器、偏振合束器和两个相位正交(In-phase & Quadrature,IQ)调制器实现PDM-QPSK信号的发送。光载波首先通过偏振分束器分为两个正交的偏振态,再分别对两个光载波进行幅度和相位维度上的调制,将4种相位状态(0、90、180和270°)用于表

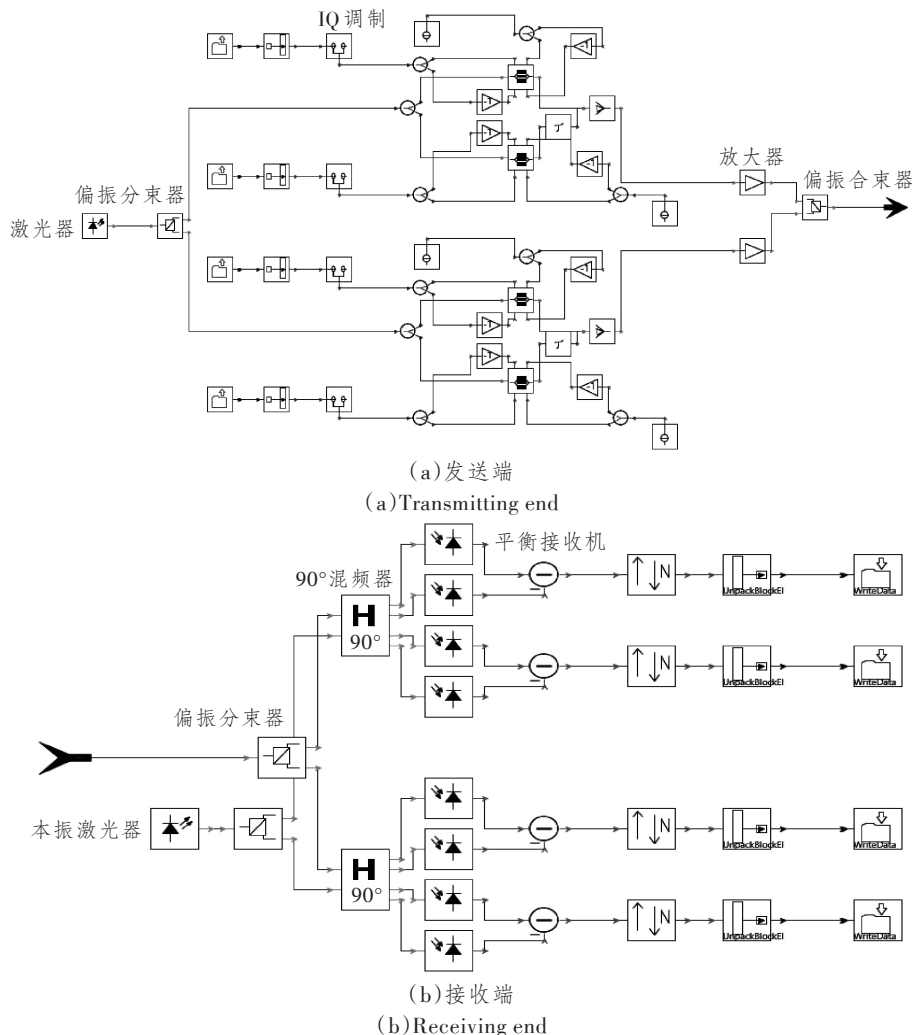
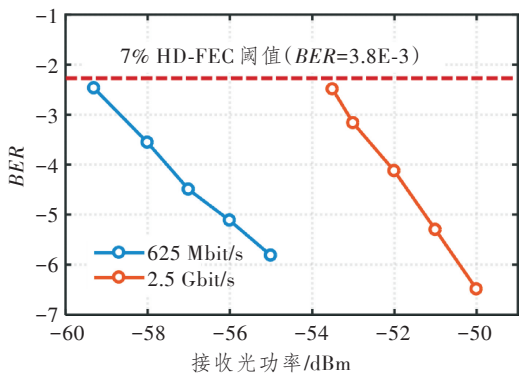


图1 信号收发机仿真结构图

Figure 1 Simulation structure of the signal transceiver

示4种不同的数据符号组合,最后将两束正交的光通过偏振合束器形成偏振复用信号光。信号光通过光衰减器进行功率衰减并用光功率计检测进入接收端的信号光功率。在接收端,信号光经过一个偏振分束器,两个正交偏振方向的光分别与本振光进行90°混频,得到与信号光的频率、相位和振幅按相同规律变化的中频信号。由于本振光功率相比信号光功率更大,所以混频后得到的中频输出光电流更大,有效提高了后续检测系统的灵敏度。然后通过光电二极管将光信号有效转换成电信号进行接收准备,最后通过平衡接收机,对电信号进行有效检测。在分束器前面不需要增加偏振控制器来控制入射光的偏振态,而是采用数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)算法进行偏振解复用。模/数转换器(Analog to Digital Converter, ADC)采样得到 I_x 、 Q_x 、 I_y 和 Q_y 4个分量后,构造出信号光两个偏振态方向的复光场,导入 Matlab 软件进行离线 DSP 及误码率(Bit Error Ratio, BER)计算。本文评估了 625 Mbit/s 和 2.5 Gbit/s 速率下 BER 性能与接收光功率的关系,即收发仿真系统灵敏度,如图 2 所示。当满足 7% 前向纠错(Forward Error Correction, FEC)阈值时^[10],625 Mbit/s 接收灵敏度为 -59.3 dBm, BER 为 $3.8E-3$; 2.5 Gbit/s 接收灵敏度为 -53.5 dBm, BER 为 $3.8E-3$ 。



注:HD-FEC 为硬判决前向纠错。

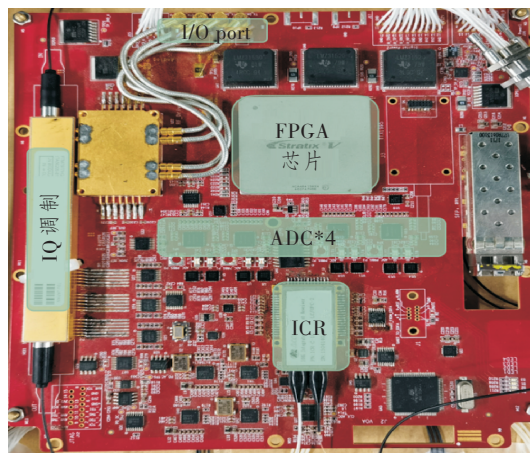
图 2 收发仿真系统灵敏度

Figure 2 The sensitivity of transceiver simulation system

2 实时数字处理及算法优化

在接收端,本文自主研发的 625 Mbit/s PDM-QPSK 实时接收机结构如图 3 所示,由本地振荡器产生的本振光和信号光一起被输入 90°光混频器进行混频,然后通过平衡接收器进行相干检测。4个分辨率为 6 位的 5 GSa/s ADC 用于对两个正交偏振 IQ 波形进行采样和数字化。然后,数字信号被

导入 FPGA 进行实时 DSP 和 BER 计算。要处理 625 Mbit/s 信号,首先要将 10 Gbit/s 接收信号以 16 倍降采样为 625 Mbit/s 等比信号。在这种情况下,FPGA 的处理时钟频率为 9.765 625 MHz。



注:FPGA 为现场可编程门阵列;ICR 为相干接收机。

图 3 625 Mbit/s 实时接收机

Figure 3 The real-time transponder at 625 Mb/s

图 4 所示为 FPGA 中实时 DSP 的芯片规划,图 5 所示为 FPGA 上的实时 DSP 流程,包括恒定模数算法(Constant Mode Algorithm, CMA)、频率偏移恢复和相位恢复。本文在 CMA 的基础上,将其实时化和并行化。并行算法相较传统的 CMA 结构,将原本串行的 X 偏振和 Y 偏振数据流转化为 32 路并行的 X 和 Y 偏振数据流,可将原本 5 Gbit/s 的采样数据降速为 156.25 Mbit/s,以流数据的方式处理,极大提高了数据的处理效率,实时化进行自适应均衡。并且对于 CMA 中的抽头系数 H-taps 的计算,仅通过第 1 路 CMA 通道的计算反馈结果,作用于其他 15 路 CMA 通道,极大地节约了相关的硬件资源。再通过 16 路并行 CMA 结构输出,最终得到均衡后的单倍采样数据。

● CMA ● 频率恢复 ● 相位恢复

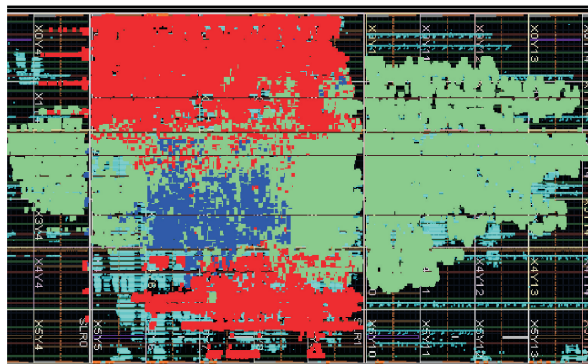


图 4 FPGA 中实时 DSP 的芯片规划

Figure 4 Chip planner of real-time DSPs in FPGA

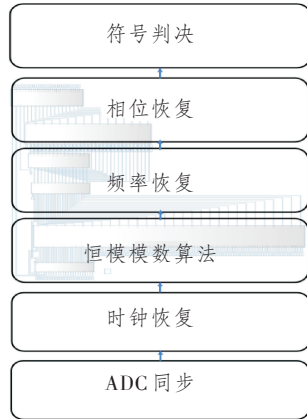


图 5 FPGA 中的实时 DSP 流程

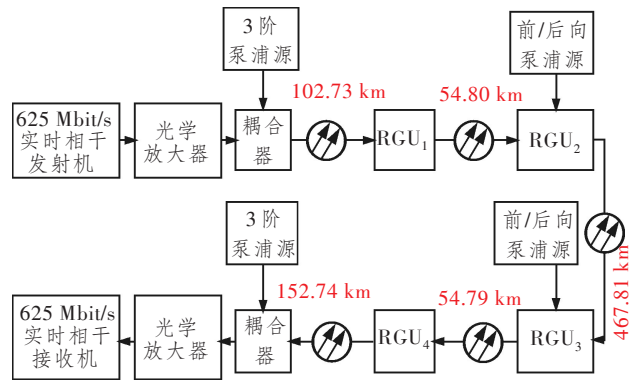
Figure 5 Real-time DSP in FPGA

频率和相位恢复基于 Viterbi-Viterbi(V-V)算法^[7]。频率和相位恢复的两种结构非常相似,均可分为 3 个步骤:偏移计算、信号恢复和符号判断。第 1 步,通过少量数据计算出信号的偏移角度,并根据坐标旋转数字计算机(Cordic)算法将复数信号转换为角度;第 2 步,经过一定延迟后,根据相应的计算角度补偿频率和相位偏移;第 3 步,对恢复的数据进行符号判定处理,以恢复原始信号。实时 DSP 的架构中包括 CMA、频率恢复和相位恢复在内的主要结构都是在 Matlab 软件中开发并由 Vivado 软件编译的。

3 超长无中继传输实验及结果分析

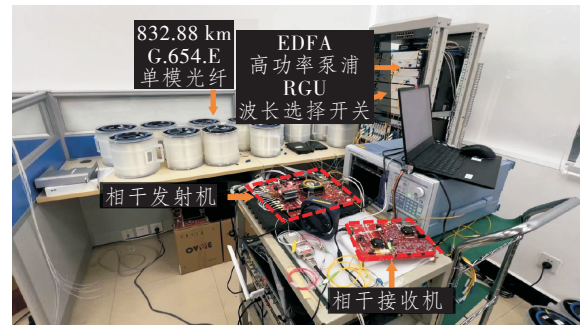
本文为验证所提超高灵敏度收发装置,搭建了传输距离为 832.88 km 的超长无中继传输系统。实验装置如图 6(a)所示,配置为在 1 550.12 nm 波长下传输 625 Mbit/s 信号。625 Mbit/s 信号由双偏振 IQ 调制器(DP-IQM)进行 PDM-QPSK 调制,基带信号由实时 FPGA 生成。跨距由超低损耗 G.654 E 单模光纤组装而成,其平均色度色散为 20 ps/nm/km,有效面积为 125 μm^2 。C 波段的典型损耗系数为 0.146~0.148 dB/km。传输光纤链路由 5 部分组成,并由 4 个 RGU 分开。发射端距离前向 RGU₁ 102.73 km, RGU₁ 距离 RGU₂ 54.80 km, RGU₄ 距离接收端 152.74 km, RGU₄ 距离 RGU₃ 54.79 km。中间跨度距离为 467.81 km,链路总长度为 832.88 km,损耗为 121.6 dB,平均光纤损耗(包括接头)为 0.146 dB/km。专用泵浦路径使用的光纤长度与信号路径相似。实验装置实物如图 6(b)所示,所有光纤长度均通过光时域反射仪(Optical time-domain reflectometer, OTDR)验证,损耗则通过光频谱分析仪(Optical Spectrum Analyzer,

OSA)测量。



(a) 系统图

(a) System diagram



(b) 实物图

(b) Physical diagram

图 6 实验装置图

Figure 6 Diagram of experimental setup

图 7 所示为基于传输光纤特性的 625 Mbit/s 系统 832.88 km 仿真光功率分布图。图 8 所示为跨度的输入和输出处的测量光谱。在 625 Mbit/s 速率下,接收机处测量到的光信噪比(Optical Signal to Noise Ratio, OSNR)为 -3.91 dB/0.01 nm,使用横河 OSA (AQ6370D),分辨率为 0.02 nm。在光纤中发射的信号等效光纤功率为 19 dBm。

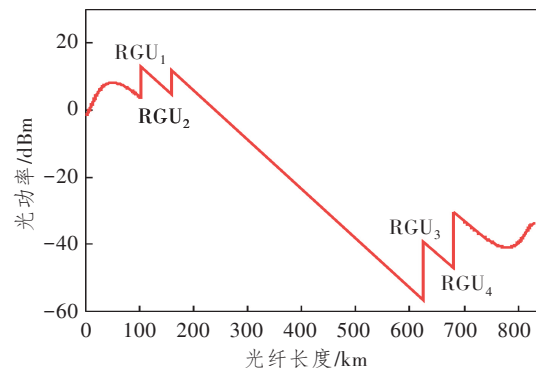


图 7 模拟光功率分布图

Figure 7 Simulated signal power distribution

到达 RGU₂ 的剩余泵功率分别为 0.81、0.25、8.20 和 8.70 dBm。RGU₁~RGU₄ 的实测增益如图 7 所示, RGU₁ 增益为 9.46 dB, RGU₂ 增益为

6.75 dB, RGU_3 为信号提供 17.3 dB 增益, RGU_4 为信号提供 17.5 dB 增益。经分析,接收机信号星座图如图 9 所示。625 Mbit/s 信号的 OSNR 为 $-3.91 \text{ dB}/0.01 \text{ nm}$, X 偏振态的误差向量幅度(Er-

ror Vector Magnitude, EVM) 为 33.12%, Y 偏振态的 EVM 为 31.98%。在整个测试期间, FEC 前的平均 BER 为 $2.04 \text{ E}-3$, 阈值为 $3.80 \text{ E}-3$ 。此外, 使用 BER 分析器监视客户端是否存在 FEC 后错误。

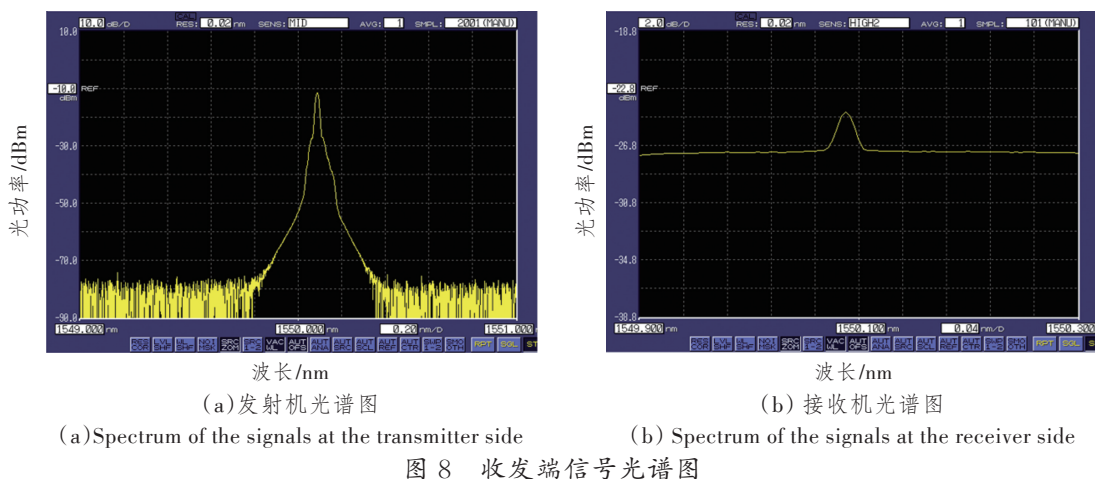


图 8 收发端信号光谱图

Figure 8 Spectrum of the signals at transmitter and receiver sides

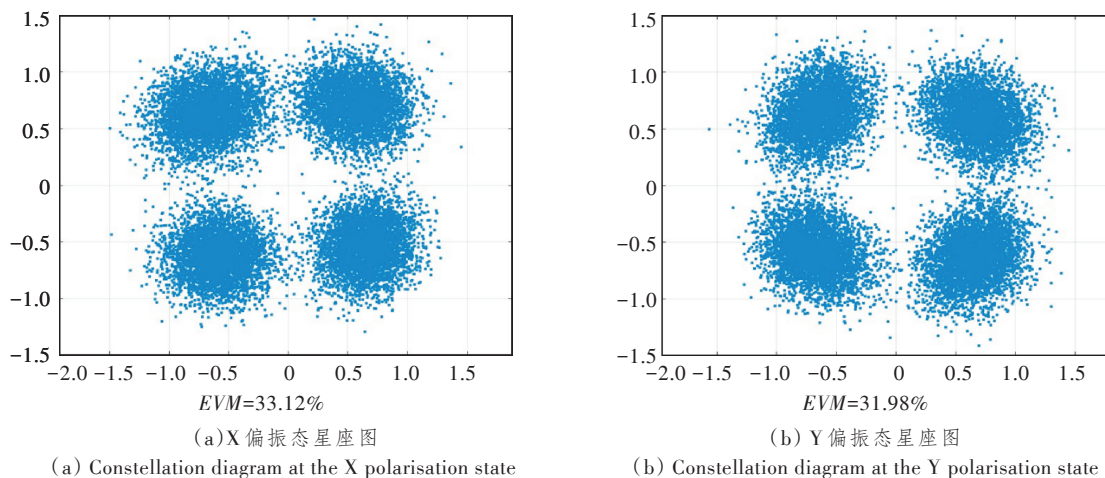


图 9 接收机处偏振态星座图

Figure 9 Constellation diagram of two polarisation states at the receiver side

4 结束语

本文通过仿真建模验证了所搭建超高灵敏度收发架构的优良灵敏度,并成功演示了 625 Mbit/s PDM-QPSK 在单光纤配置下的实时无中继传输,传输距离超过 832.88 km,为目前业内领先的无中继传输距离记录。该速率可支持 6 路 100 Mbit/s 协议链路。传输链路由 832.88 km 超低损耗 G. 654E 单模光纤组成,总传输损耗为 121.6 dB。该线路包括发送端两个正向 RGU 和接收端两个反向 RGU,整条光纤链路中不放置任何供电设备。本方案采用了高性能拉曼泵浦、创新的 RGU 架构、超低损耗大有效面积光纤和基于 FPGA 的超高灵敏度实时 PDM-QPSK 收发机,具有广阔的发展研究

潜力。

参考文献:

- [1] Xu J, Sun S, Hu Q, et al. Unrepeated Transmission over 670.64 km of 50 G BPSK, 653.35 km of 100 G PS - QPSK, 601.93 km of 200 G 8QAM, and 502.13 km of 400 G 64QAM[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(2): 522-530.
- [2] Xu J, Hu Q, Sun S, et al. Single - Carrier 500 Gb/s Unrepeated Transmission over a Single 431 km Span with Single Fiber Configuration [C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2020. San Diego, California, USA: Optica Publishing Group, 2020: Th1D.2.
- [3] Xu J, Huang L, Yu J, et al. Transmission of 2.5 Gbit/s

- PM-BPSK over 606.5 km with a Span Loss in Excess of 101 dB[C]//2018 23rd Opto-Electronics and Communications Conference (OECC). Jeju, Korea: IEEE, 2018: 8730077.
- [4] Xu J, Yu J, Hu Q, et al. Longest-ever Unrepeated Transmission over 713.2 km of 2.5 Gbit/s with a Span Loss in Excess of 111 dB[C]//CLEO Pacific Rim Conference. Hong Kong, China:OSA, 2018: Tu2I.5.
- [5] Wu J, Xu J, Hu Q, et al. Unrepeated Transmission of Single-Carrier 800 Gb/s over 404 km with Commercial Transceiver and Enhanced ROPA System [C]//2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Francisco, CA, USA: IEEE, 2021: 9489592.
- [6] Xu J, Yu J, Hu Q, et al. 50 G BPSK, 100 G SP-QPSK, 200 G 8QAM, 400 G 64QAM Ultra Long Single Span Unrepeated Transmission over 670.64 km, 653.35 km, 601.93 km and 502.13 km Respectively [C]//2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego, CA, USA:IEEE, 2019: 8696612.
- [7] Januário J C S S, Rossi S M, José H C, et al. Single-Carrier 400 G Unrepeated WDM Transmission over 443.1 km [C]//2017 European Conference on Optical Communication (ECOC). Gothenburg, Sweden: IEEE, 2017: 8345853.
- [8] Wu J, Ao X, Xu G, et al. Real-Time Unrepeated Transmission over 500-km SMF of 4×10 G PDM-QPSK with EDFA Amplification Only [C]//2022 Asia Communications and Photonics Conference (ACP). Shenzhen, China:IEEE, 2022: 10088843.
- [9] 吴俊宇, 敖学渊, 邓磊, 等. 基于放大器优化的无中继通信系统研究[J]. 光通信研究, 2024(4):230003.
- Wu J Y, Ao X Y, Deng L, et al. Research of Unrepeated Transmission System based on Amplifier Optimization [J]. Study on Optical Communications, 2024(4): 230003.
- [10] Mizuochi T. Next Generation FEC for Optical Communication [C]//OFC/NFOEC 2008 - 2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference. San Diego, CA, USA: IEEE, 2008: 4528593.