

实时化自由空间光通信技术研究

敖学渊, 杨奇*, 戴潇潇, 吴俊宇, 王忠忠, 王元祥, 刘陈

华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074

摘要 针对自由空间光(FSO)通信的实时化应用问题,本文采用自研的收发一体实时数字相干通信模块,基于自由空间光信道,通过实验验证了 8×10 Gb/s、偏振复用正交相移键控(PDM-QPSK)信号的实时相干通信系统。在 7%前向纠错码(FEC)条件下,通过使用掺铒光纤放大器(EDFA)调整接收端功率,该实时数字相干通信系统的单通道背靠背接收灵敏度达到了 -50 dBm 左右;8 路信道的光载波频率间隔为 12.5 GHz,且在不引入其他损耗的情况下,通过 1 m 左右的空间光链路实现了全信道的无误码传输。

关键词 光通信; 实时算法; 自由空间光通信; 数字相干通信; 波分复用

中图分类号 O436 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/CJL202249.1206004

1 引言

近年来,随着光通信行业的发展,现有的光通信网络,包括城域网、接入网、数据中心光互连等,都呈现出快速发展的趋势,光通信网络架构日趋完善。同时,光通信这一领域已发展到较为成熟的阶段,除了在现有基础上继续深挖之外,一些新的光通信业务和应用场景逐步进入人们的视野。光通信领域的发展也逐步向这些新的应用场景倾斜,对当下的光通信网络进行补全和扩展,例如卫星通信网络^[1]、电力通信网络、海洋通信网络等^[2]。“海陆空天一体化”的立体光通信网络架构越来越多地被人们提及。光通信网络正逐渐从点到点、端到端的模式向多元化、多样化、多模态发展。

在未来多模态发展的光通信中,自由空间光通信以其无需频带许可、保密性强、安装架设灵活、通信速率高、容量大等独特优势^[3-4]受到了越来越多研究者的关注,成为未来光通信研究发展的热点之一。而在其他诸多应用场景中,如卫星通信、“最后一公里”链路,以及山林、湖泊等光纤链路难以部署的区域,自由空间光通信以其独特且难以替代的作用,使得其研究意义与价值越发凸显^[5-6]。近年来,自由空间光通信的相关工作正在陆续展开,并取得了一定成果,其中

有空间光系统信道方面的研究成果,例如,分析空间光信道中大气湍流的影响并抑制大气湍流损伤^[7-8],探讨如何有效地实现空间光到光纤的耦合^[9],还有为使信号更贴合空间光通信系统而对空间光本身的编码和调制格式进行研究所取得的相关成果^[10-11]。同时,相关的空间光传输实验也有报道,如:文献[12-13]展示了一个基于自由空间信号的相干光通信系统,并对其性能进行了详细分析;文献[14]则采用 Kramers-Kronig(KK)接收机,在 55 m 自由空间光链路上传输了双载波 25 GBaud 32QAM 信号;文献[15]报道了一个在 2.5 km 自由空间光链路上传输速率为 10 Gb/s 的正交频分复用(OFDM)传输系统。自由空间光通信系统的相关研究与实验已取得了一定进展与突破,而在此之上进一步发展更贴近实际应用的实时化自由空间光通信研究就变得愈发有吸引力。

本课题组通过实验演示了一个实时多载波自由空间光相干通信系统,该系统使用了自行设计的基于现场可编程逻辑门阵列(FPGA)的电路板,该电路板包括一台支持 2.5 GBaud 通信速率的发射机、4 片采样率为 5 GSa/s 的模数转换器(ADC)、一个双偏振 IQ 调制器。FPGA 生成 10 Gb/s 的信号,双偏振 IQ 调制器将调制后的偏振复用正交相移键控(PDM-QPSK)信号加载到频率间隔为 12.5 GHz 的

收稿日期: 2022-01-11; 修回日期: 2022-01-31; 录用日期: 2022-03-04

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1801303)、WNLO 创新基金

通信作者: *yangqi@hust.edu.cn

8 路光载波上。在 1 m 的空间光信道下,系统实现了 8×10 Gb/s 实时空间光信号的无误码传输。在 7% 前向纠错码(FEC)开销的限制下,实现了接近 -50 dBm 的系统接收灵敏度。

2 原理与实验

2.1 实验方案设计

本课题组基于 1 m 的自由空间光信道和实时数字相干通信模块设计的传输实验系统架构如图 1 所示。在实时数字相干通信模块中,选用的 FPGA 芯片为 Altera 中的 Stratix V 系列芯片,型号为 5SGSMD8K2F40C3。所有算法功能均在 FPGA 工程中完成。为了较好地观察部分结果和实时化流程的中间状态,使用嵌入式逻辑分析仪(Signaltap)抓取

这部分内容并导出到 MATLAB 中进行观察与分析。

在系统的发射端,使用 8 个外腔激光器(ECL)作为各路信道的载波光源,激光器线宽约为 100 kHz,频率间隔为 12.5 GHz,具体的波长参数设置如图 1 中的表格所示。所有的光载波通过光耦合器耦合,然后送入双偏振 IQ 调制器中进行调制,调制后的信号光谱如图 2 所示,按 12.5 GHz 频率间隔分布于 1550 nm 附近。调制信号由 FPGA 内部模块生成, FPGA 工作时钟的频率为 156.25 MHz,并行路数为 64,可以生成 4 路速率为 2.5 Gb/s、单波长速率为 10 Gb/s 的伪随机比特序列 PRBS23(作为初始信号)。调制后的 8×10 Gb/s PDM-QPSK 光信号通过掺铒光纤放大器(EDFA)进行放大(调整发射信号功率),然后进入空间光链路中传输。

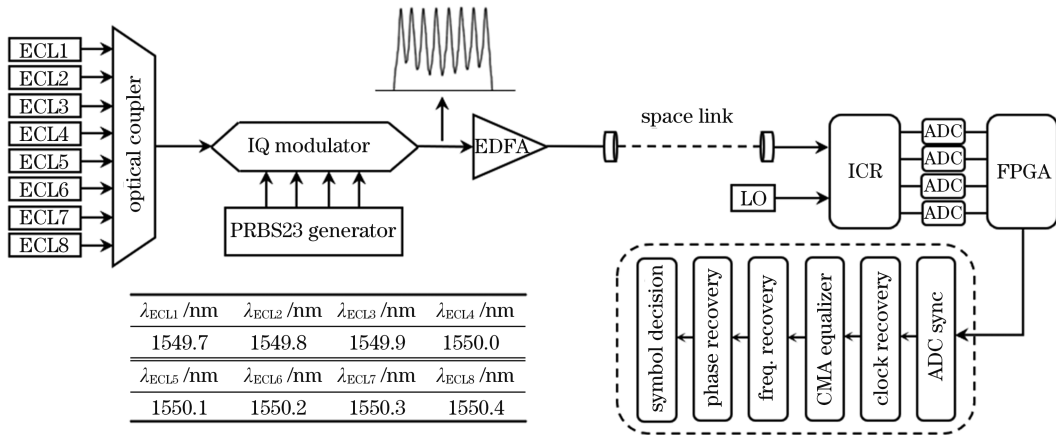


图 1 自由空间光链路中 8×10 Gb/s PDM-QPSK 的实时相干传输实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of real-time 8×10 Gb/s PDM-QPSK coherent transmission over a free space optical link

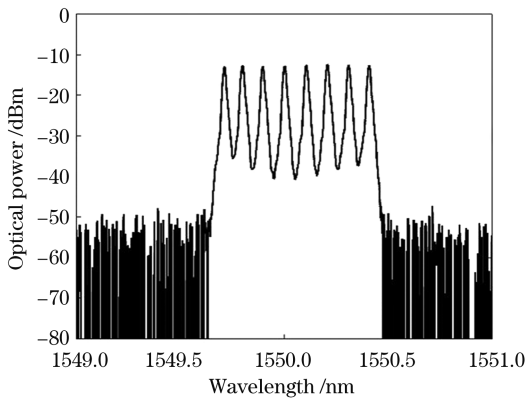


图 2 发射信号的光谱

Fig. 2 Optical spectrum of transmitted signal

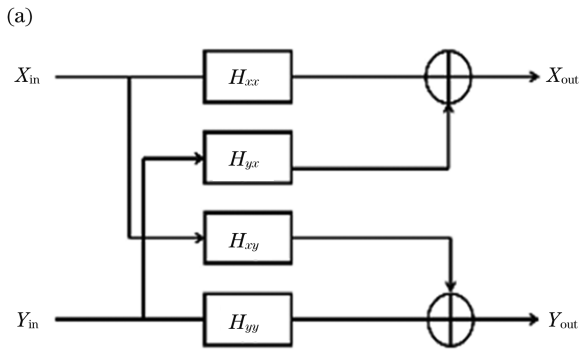
在系统接收端,集成相干接收器(ICR)接收经自由空间链路传输的光信号,并将其与本地激光源(LO)提供的本振激光进行混频,然后进行光电转换。ICR 输出的电信号由 4 个模拟带宽均为 6 GHz 的 6 bit 5 GSa/s ADC(型号为 AAD06S8000)进行

采样。在波分复用过程中,各个子载波上的信号会被 ADC 本身的 6 GHz 输入信号带宽限制,从而大幅降低了信道间的干扰。因此,只需要通过调谐本振激光的波长就可以选择不同的子载波信道,而无须采用任何光学滤波器。最终,ADC 输出的采样信号由 FPGA 中的数字信号处理(DSP)算法进行相应的实时解调恢复。在 FPGA 中,DSP 算法主要包括 ADC 同步、时钟数据恢复、恒模算法(CMA)、频偏恢复算法、相位补偿算法和符号判决^[16]。符号判决后输出信号的误码率(BER)可在误码仪中进行观察。值得一提的是,鉴于开发板本身设计导致的硬件缺陷,在较为极限的误码率测试情况下,本文通过 Signaltap 将实时恢复的信号星座图导入 MATLAB 中计算信噪比(SNR),进而推算误码率。MATLAB 的工作仅是画出实时恢复信号的星座图,完成 SNR 和 BER 的计算,并不参与任何信号处理。为了满足信号实时化恢复的时序要求,在 FPGA 的接收端

DSP 中, FPGA 工作时钟的主频率为 156.25 MHz, 并行通道数为 32×4 , 分别对应信号中 X 偏振的实部(X_i)与虚部(X_q), 以及 Y 偏振的实部(Y_i)与虚部(Y_q)。

2.2 实时数字信号处理

在 2.1 节所描述的 6 个主要的 DSP 算法中, 对



实时化技术较为关键的是 CMA、频偏恢复算法以及相位补偿算法。离线 DSP 架构如图 3 所示^[17], 实时 DSP 架构如图 4 所示。在上述架构中, 经 ADC 两倍采样后的 5 Gb/s 数字信号经过串并转换后, 从串行数据流转换为 32 路并行数据, 然后依次经过 3 个 DSP 模块进行相应的处理。

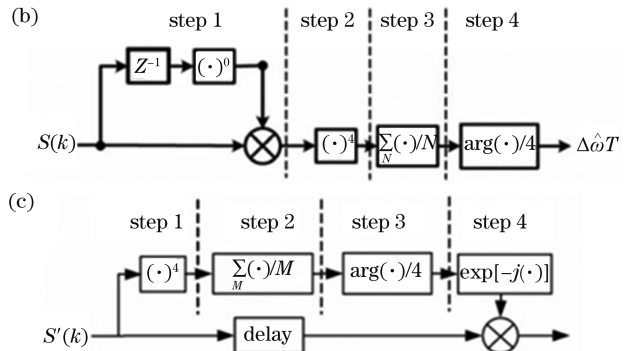


图 3 离线 DSP 架构。(a)CMA;(b)频偏恢复;(c)相位补偿

Fig. 3 Offline DSP architecture. (a) CMA; (b) frequency offset recovery; (c) phase recovery

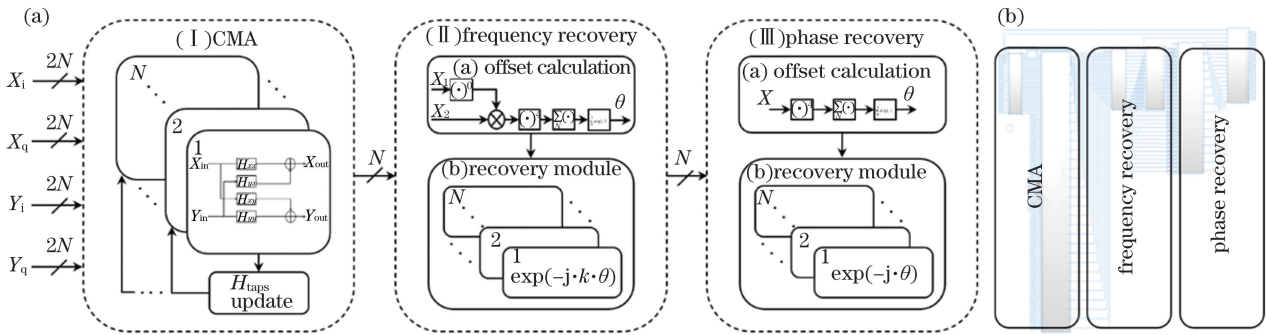


图 4 实时 DSP 架构。(a)FPGA 中主要的实时 DSP 架构;(b)Dspbuilder 中的 DSP 框图

Fig. 4 Real-time DSP architecture. (a) Core real-time DSP architecture in the FPGA; (b) DSP structure in Dspbuilder

首先, 相较于传统的 CMA 算法结构, 在并行化的 CMA 模块中, 本文将原本串行的 X 偏振、Y 偏振数据流转化为 32 路并行的 X、Y 偏振数据, 将原本 5 Gb/s 的数据码流降速为 156.25 Mb/s, 以满足 FPGA 的时序要求, 并以流数据的方式处理, 极大地提高了数据的处理效率, 能够实时化地进行自适应均衡。其次, 对硬件资源的使用进行相应考虑, 本文选择 5 抽头的一个 CMA 架构; 同时, 针对 CMA 中抽头系数(H_{taps})的计算, 本文仅通过第一路 CMA 通道的计算结果进行反馈, 反馈作用于全部的 16 路 CMA 通道, 极大地节约了相关的硬件资源, 如图 4(a) 中的(I)所示。最后, 通过 16 路并行 CMA 结构输出, 得到均衡后的单倍采样数据。经过 CMA 模块后, 信号的过采样率将从 2 倍降低到 1 倍, 相应地, 数据的并行路数将从 32 路减少到 16 路。

针对 CMA 之后输出信号的频偏恢复和相位补

偿, 本文采用了 Viterbi & Viterbi(V-V)算法。该算法结构如图 3(b)和图 3(c)所示。图 3(b)为 V-V 频偏恢复算法结构, 算法流程主要分为 4 步: 1) 接收信号前后共轭相乘, 得到前后信号的相位差, 去除激光器线宽引入的相位损伤; 2) 对于 QPSK 信号, 采用四次方运算去除信号调制相位的影响; 3) 取多个样值的算数平均值, 去除噪声相位的影响; 4) 计算复数信号角度得到频偏估计值并进行补偿。对于 V-V 相位补偿算法来说, 其与频偏估计类似, 只不过频偏算法已去除了信号频偏的影响, 而相位补偿只需要对残余的相位误差进行纠正。相位补偿算法的结构如图 3(c)所示。

实时化的频偏相位补偿算法如图 4(a) 中的 (II) 和 (III) 所示。这两种算法的结构非常相似, 它们都是通过一个算法模块来计算频率和相位的偏移, 然后 16 个并行子模块根据计算出的偏移角对信

号进行恢复。其中 Cordic (Coordinate rotation digital computer) 算法用于在 FPGA 中计算复数信号的角度。值得注意的是,在实时化的频偏相位补偿算法中,数据的输入和频率与相位偏移角的输出存在一定的延迟,因此,16 个并行子模块的补偿会整体延迟相应的时钟频率间隔(频偏恢复约为 $0.73 \mu\text{s}$, 相位补偿约为 $0.3 \mu\text{s}$),但这并不影响恢复信号的实时输出。

本文中,所有的实时 DSP 都是在 Dspbuilder 中完成的。Dspbuilder 是一款由 Quartus 在 MATLAB 中开发的软件,它通过模块化的编程和快捷的 MATLAB 联合仿真,极大地提高了实时化算法的编译效率。图 4(b) 给出了 Dspbuilder 中的主要 DSP 框图。

3 分析与讨论

实验平台如图 5(a) 所示。图 5(b) 展示了本文

采用的自研收发一体数字相干模块。信号的发射端(包括 PRBS 产生器和双偏振 IQ 调制器)和接收端(包括 ICR、ADC 和 FPGA)都集成在一个小尺寸($18 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$)、低功耗(约为 67 W)的电路板上。整体的系统工程以及实时算法仅使用了 983 个 DSP 乘法模块和 64649 个自适应逻辑块(ALMs), 占总 DSP 乘法模块资源的 50% 和总 ALMs 资源的 25%。FPGA 芯片中的算法区分如图 5(c) 所示,红色区域为 CMA 的 DSP 占用区域,绿色和蓝色区域分别为频率和相位偏移恢复算法占用区域。表 1 给出了不同算法模块的具体资源占用情况以及 FPGA 芯片的总体资源(1963 个 DSP 乘法模块, 262400 个 ALMs)。具体来说,CMA 模块占用了 39% 的 DSP 乘法模块和 10% 的 ALMs, 频偏恢复模块占用了 4.5% 的 DSP 乘法模块和 13% 的 ALMs, 相位补偿模块占用了 6.5% 的 DSP 乘法模块和 2% 的 ALMs。

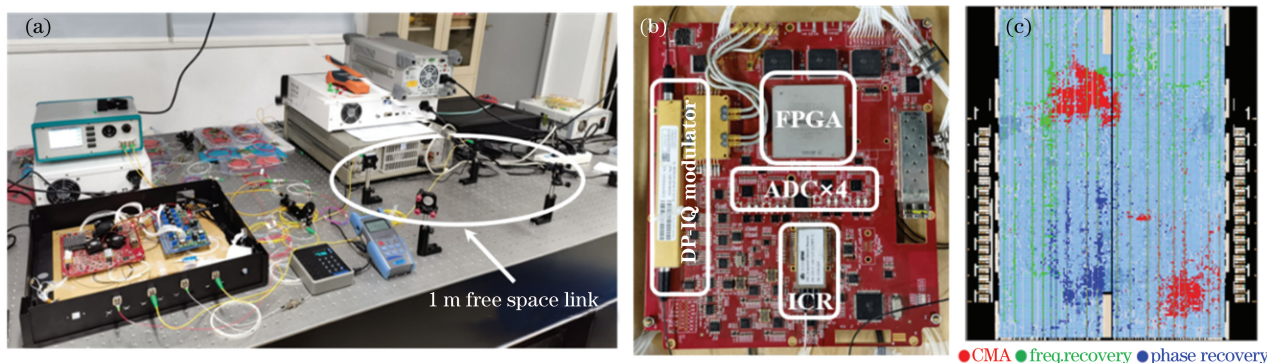


图 5 实物图。(a) 实验平台; (b) 集成电路板; (c) FPGA 中 DSP 架构的芯片规划

Fig. 5 Pictures. (a) Experimental platform; (b) integrated electrical board; (c) chip planner of DSP architecture in FPGA

表 1 FPGA 中 DSP 的资源占用情况

Table 1 Resource consumption of DSP in FPGA

Item	Quantity of total DSP blocks(propotion)	Quantity of ALMs(propotion)
FPGA(5SGSMD8K2F40C3)	1963	262400
DSP architecture in FPGA		
CMA	764 (39%)	26175 (10%)
Frequency recovery	89 (4.5%)	33853 (13%)
Phase recovery	130 (6.5%)	4255 (2%)
All	983 (50%)	64649 (25%)

在实验中,本课题组首先测试了实时化集成相干接收机在背靠背条件下的接收灵敏度,结果如图 6(a) 所示。通过调节可调光衰减器的衰减系数,逐渐将接收机的接收光功率从 -45 dBm 降低到 -51 dBm , 并通过 SNR 来推算 BER(记为 f_{BER})。当接收光功率为 -50 dBm 时, BER 约为 2.9×10^{-3} , 低于 7% 开销的硬判决 FEC 门限 ($f_{\text{BER}} =$

3.8×10^{-3})。图 6(a) 还分别给出了 -45 dBm 和 -50 dBm 灵敏度下的星座图。

对于多载波自由空间光通信实验,图 6(b) 给出了接收端接收到的光信号的光谱。经过 1 m 空间光信道,在不引入额外衰减的情况下,所有通道的信号均可实现无差错恢复,本文选取第 8 路信道的结果进行展示,如图 6(b) 所示。

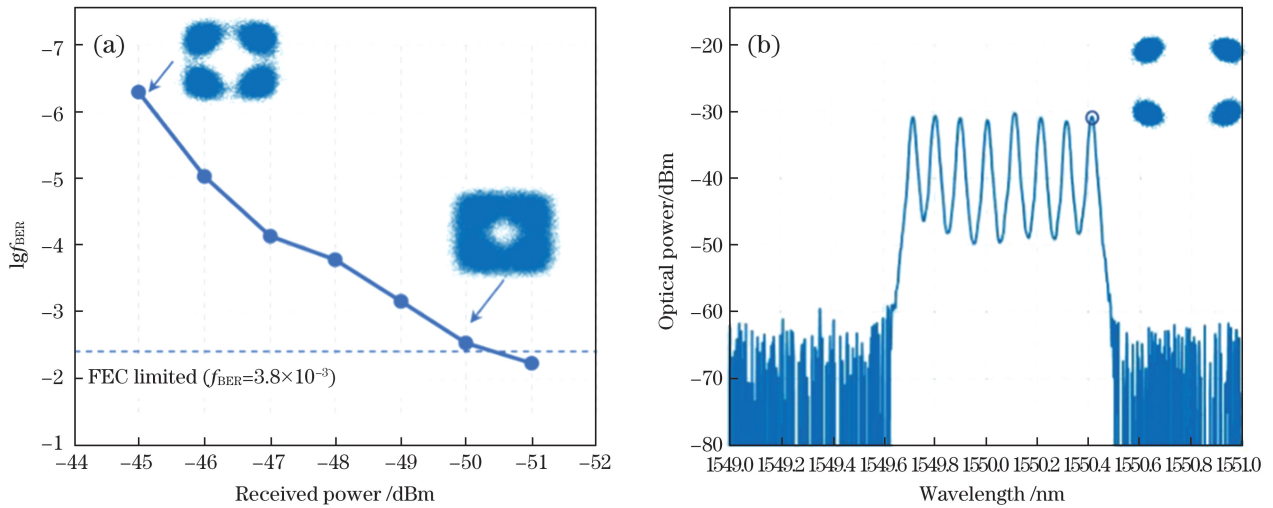


图 6 实验结果。(a)背靠背传输实验的 BER 性能;(b)接收信号的光谱和第 8 路信道恢复后的星座图
 Fig. 6 Experimental results. (a) BER performance in a BTB transmission; (b) optical spectrum of received signal and recovered constellation diagram of channel 8

图 7(a)~(d)展示了 FPGA 中各主要 DSP 算法阶段的实时处理结果,这里同样选取第 8 路信道的结果进行展示。图 7(a)为 ADC 的采样数据,即未经过 DSP 算法实时处理的原始数据星座图;

图 7(b)为 CMA 均衡之后的数据星座图;图 7(c)为频偏恢复之后的数据星座图;图 7(d)为相位补偿之后的数据星座图,同时也是实时 DSP 算法最终的恢复结果。

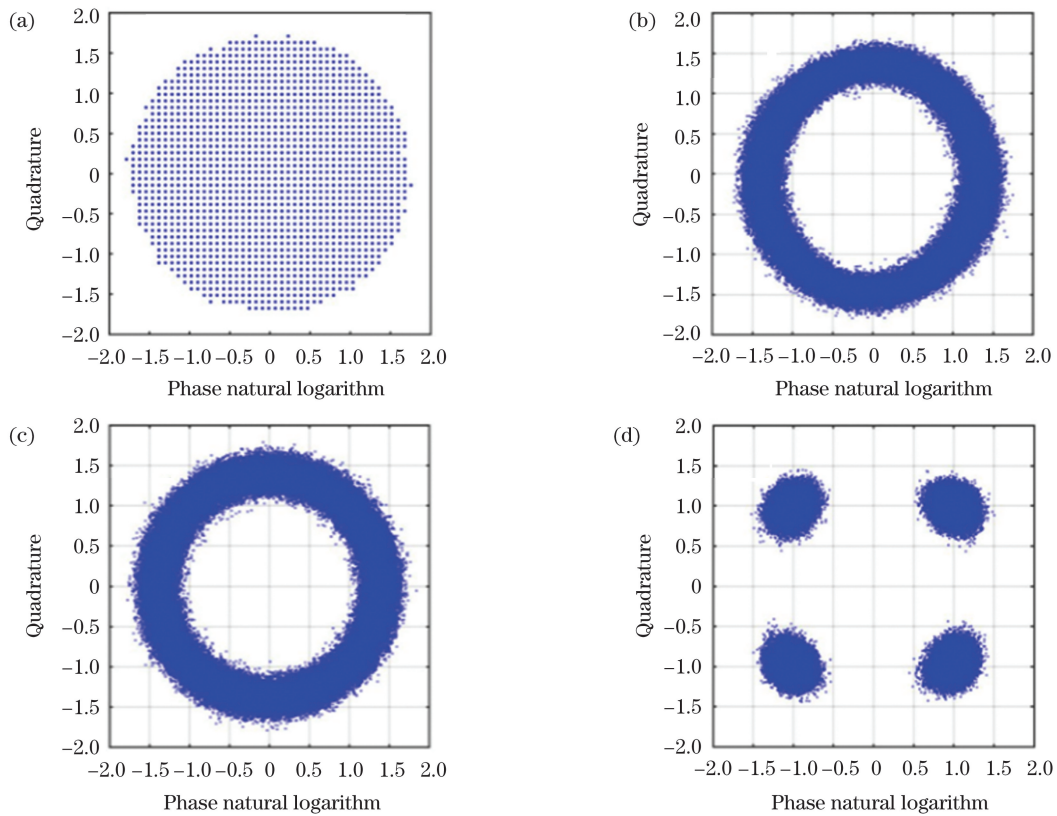


图 7 DSP 实时算法处理结果。(a)ADC 采样数据;(b)CMA 均衡结果;(c)频偏恢复结果;(d)恢复的星座图
 Fig. 7 Real-time DSP results. (a) ADC sampling data; (b) CMA result; (c) frequency offset recovery result; (d) constellation diagram after recovery

4 结 论

本文在自由空间光链路中通过实验演示了一个 8×10 Gb/s PDM-QPSK 实时数字相干通信系统, 基于 FPGA 芯片, 完成了实时化算法的编程, 并进行了相应的性能测试。实验结果表明, 使用 EDFA 之后, 在 7% FEC 门限下, 数字相干模块的接收灵敏度低至 -50 dBm; 并且, 在频率间隔为 12.5 GHz、自由空间信道长度为 1 m 的条件下, 该系统中的 8 路信道均实现了实时无误码传输。

参 考 文 献

- [1] 张晓玉, 崔晟, 刘德明, 等. 星地下行链路中多孔径相干光接收机性能分析[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(21): 210101.
Zhang X Y, Cui S, Liu D M, et al. Performance analysis of multi-aperture coherent optical receiver for satellite-to-ground downlink [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(21): 210101.
- [2] 华炳昌. 面向多业务融合的光接入网结构与关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.
Hua B C. Research on structure and key technology of optical access network for multi-business convergence[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [3] Brown C L, Wilson S G, Cvijetic N, et al. OPN01-4: WiMAX access using optical wireless technology with heterodyne detection in turbulent atmospheric channels[C]//IEEE Globecom 2006, November 27-December 1, 2006, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2006: 10284983.
- [4] 吴琰, 梅海平, 魏合理. 联合信道条件下自由空间光通信系统性能分析[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(5): 050101.
Wu Y, Mei H P, Wei H L. Performance analysis of free-space optical communication system under joint channel conditions [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(5): 050101.
- [5] 王也. 空间相干光通信系统中的数字信号处理技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2020.
Wang Y. Research on digital signal processing technology in free-space coherent optical communication system[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [6] de Souza Lopes C H, Lima E S, Pereira L A M, et al. Non-standalone 5G NR fiber-wireless system using FSO and fiber-optics fronthauls[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(2): 406-417.
- [7] 曹明华, 武鑫, 王惠琴, 等. Gamma-Gamma 大气湍流下超奈奎斯特光通信系统性能[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0906003.
Cao M H, Wu X, Wang H Q, et al. Performance of faster-than-Nyquist optical communication system under gamma-gamma atmospheric turbulence [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0906003.
- [8] 周畅, 于笑楠, 姜会林, 等. 基于 APD 自适应增益控制的近地无线激光通信信道大气湍流抑制方法研究[J]. 中国激光, 2022, 49(4): 0406002.
Zhou C, Yu X N, Jiang H L, et al. Atmospheric turbulence suppression methods for near the earth wireless laser communication channels based on avalanche photodiode adaptive gain control [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(4): 0406002.
- [9] 何爽, 张鹏, 魏佳, 等. 面向大气激光通信的空间光到少模光纤耦合特性研究[J]. 中国激光, 2021, 48(23): 2306001.
He S, Zhang P, Wei J, et al. Analyses of coupling characteristics of space light to few-mode fiber for atmospheric laser communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(23): 2306001.
- [10] 文豪, 曹阳, 彭小峰, 等. 自由空间光通信中的 MIMO 极化编码方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 1906004.
Wen H, Cao Y, Peng X F, et al. MIMO polarization-coding method in free space optical communication [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 1906004.
- [11] 王宝鹏, 余锦, 王云哲, 等. 大气激光通信强度调制技术差错性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(23): 230604.
Wang B P, Yu J, Wang Y Z, et al. Error-performance study of intensity modulation technology in atmospheric laser communication [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(23): 230604.
- [12] Liu Z C, You Q, Li X, et al. A 2×4 90° optical hybrid for free-space coherent optical communication based on a birefringent crystal [C] // Asia Communications and Photonics Conference 2016, November 2-5, 2016, Wuhan, China. Washington, D.C.: OSA, 2016: ATH3D.1.
- [13] Cao J T, Zhao X H, Liu W, et al. Performance analysis of a coherent free space optical communication system based on experiment [J]. Optics Express, 2017, 25(13): 15299-15312.
- [14] Lorences-Riesgo A, Guiomar F P, Sousa A N, et al. 200 Gbit/s free-space optics transmission using a Kramers-Kronig receiver [C] // 2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC),

- March 3-7, 2019, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2019: 18618357.
- [15] Cvijetic N, Qian D Y, Wang T. 10Gb/s free-space optical transmission using OFDM [C] // 2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, February 24-28, 2008, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2008: 10063525.
- [16] 周娴. 100Gbps PM-(D)QPSK 相干光传输系统 DSP 算法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2011.
- Zhou X. Research on DSP algorithms of 100 Gbps PM-(D)QPSK optical coherent transmission system [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2011.
- [17] 余建军. 高速光纤通信中数字信号处理算法原理与应用: 单载波调制技术 第一卷[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018.
- Yu J J. Principles and applications of digital signal processing algorithms in high-speed optical fiber communication: single carrier modulation technology. Volume 1 [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2018.

Real-Time Free-Space Optical Communication Technology

Ao Xueyuan, Yang Qi^{*}, Dai Xiaoxiao, Wu Junyu, Wang Zhongzhong, Wang Yuanxiang,
Liu Chen

School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China

Abstract

Objective Recently, there has been a rapid evolution in optical communication systems, leading to the establishment and development of various subdivisions, such as metropolitan area networks, access networks, and data center optical interconnection. However, current optical network architectures available on the ground are becoming insufficient to meet the growing demands of the society. Therefore, some new application scenarios, such as satellite communication, marine communication, and communication in some areas where optical fibers are difficult to arrange, e. g., mountains, forests, and lakes, are attracting widespread attention. Based on current optical communication network architectures, a three-dimensional, spatial, and multimodal optical network system is emerging. In this system, the free-space optical (FSO) communication featuring unlicensed bandwidth, high capacity, strong confidentiality, and easy setup plays an important role. Therefore, for practical in-field application of FSO communication, studies on embedded real-time FSO systems are necessary.

Methods To investigate the real-time applications of FSO transmission, in this study, we experimentally demonstrate a real-time multicarrier FSO communication system with a self-designed electrical board, including a field-programmable gate array (FPGA), four-channel transmitter supporting 2.5 GBaud signals, and 4×5 GSa/s analog-to-digital converter (ADC). The 10 Gb/s polarization digital multiplexing quadrature phase-shift keying (PDM-QPSK) signals were generated using a dual-polarization IQ (DP-IQ) modulator and loaded onto eight optical carriers spaced at 12.5 GHz. All optical carriers can be recovered with an error-free bit error ratio (BER) performance.

Results and Discussions The experiment setup of the real-time 8×10 Gb/s PDM-QPSK coherent transmission over a 1 m FSO link and the experiment platform are shown in Figs. 1 and 5 (a), respectively. At the transmitter side of the system, eight external cavity lasers with ~ 100 kHz linewidth spaced at 12.5 GHz were used as the sources. All the channels were coupled using an optical coupler and fed into a DP-IQ modulator, where the 10 Gb/s pseudo-random-bit-sequences-23 were modulated. The signal spectrum of the transmitted signal is shown in Fig. 2. Then, the optical signal was amplified using erbium-doped fiber amplifiers (EDFA) to adjust the power and transmit it into the free-space link. At the receiver side, the signal was detected using an integrated coherent receiver and ADC. Subsequently, different channels were selected by tuning the wavelength of a local oscillator without any optical filter. All the sampled signals were processed using the FPGA with real-time digital signal processing (DSP) algorithms, including ADC synchronization, clock recovery, constant modulus algorithm (CMA), frequency offset recovery, phase offset recovery, and symbol decision, as shown in Fig. 1. The results of the experiment were

shown in Figs. 6 and 7. Figure 6 (a) shows the receiver sensitivity of the real-time integrated coherent receiver in a back-to-back case. By adjusting the optical attenuator, we reduced the receiver power from -45 to -51 dBm and obtained the BER using the signal-to-noise ratio. When the receiver power is -50 dBm, BER is 2.9×10^{-3} , which is under the 7% FEC limit (BER is 3.8×10^{-3}). Figure 6 (b) shows the received spectrum and constellation diagram from channel 8 in the multicarrier FSO experiment. The results of each stage of the real-time algorithm processing are shown in Fig. 7. Figures 7 (a)–(d) represent the sampled data of ADC without DSP algorithms, results after CMA, results after frequency offset recovery, and results after phase compensation, respectively.

Conclusions In this study, we propose an 8×10 Gb/s PDM-QPSK real-time digital coherent communication system via experiments using a free-space link. Based on an FPGA chip, we have completed the programming of the real-time DSP algorithms and conducted the corresponding performance test. The experimental results show that after using EDFA, under the 7% FEC threshold, the receiving sensitivity of the digital coherent module is as low as -50 dBm. Furthermore, all the channels of the system with 12.5 GHz frequency intervals achieve a real-time error-free transmission through a 1 m free-space link.

Key words optical communications; real-time algorithm; free-space optical communication; digital coherent communication; wavelength division multiplexing