

引用本文:曹明华,王效兵,陈鹏宇,等.一种基于FPGA的FTN-VLC系统设计与测试[J].光通信技术,2024,48(2):1-6.

一种基于FPGA的FTN-VLC系统设计与测试

曹明华¹,王效兵¹,陈鹏宇²,张家玮¹,周洪涛¹,张悦¹

(1.兰州理工大学 计算机与通信学院,兰州 730050;2.西南民族大学 计算机科学与工程学院,成都 610041)

摘要:为了提升可见光通信(VLC)系统的传输速率和频谱利用率,设计了一种基于现场可编程门阵列(FPGA)超奈奎斯特(FTN)-VLC系统。该系统主要由FPGA、数/模(D/A)转换器、低通滤波器、雪崩二极管、电流/电压(I/V)转换器和电压比较器组成。对系统的软件和硬件进行了仿真分析和性能测试。仿真与测试结果表明:当传输距离为0.5 m时,系统的数据传输速率可达10 Mb/s,频谱利用率较同等条件下的奈奎斯特光通信系统提升了18.25%。

关键词:可见光通信;超奈奎斯特;现场可编程门阵列

中图分类号:TN929.12; **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2024)02-0001-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.02.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design and test of FTN-VLC system based on FPGA

CAO Minghua¹, WANG Xiaobing¹, CHEN Pengyu², ZHANG Jiawei¹, ZHOU Hongtao¹, ZHANG Yue¹

(1. School of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. School of Computer Science and Engineering, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to improve the transmission rate and spectrum utilization of visible light communication (VLC) systems, a field programmable gate array(FPGA) based on faster-than-Nyquist(FTN)-VLC system is designed. The system mainly consists of FPGA, digital-to-analog(D/A) converter, low-pass filter, avalanche photodiode, current-to-voltage(I/V) converter, and voltage comparator. Both software and hardware of the system are simulated and tested. The simulation and test results indicate that when the transmission distance is 0.5 m, the data transmission rate of the system can reach 10 Mb/s, and the spectrum utilization is improved by 18.25% compared to the Nyquist optical communication system under the same conditions.

Key words: visible light communication, fast-than-Nyquist, field programmable gate array

0 引言

随着大数据、智能接入、物联网等技术的快速发展,数据通信量呈现出爆炸式增长,对系统的传输速度和频谱效率提出了前所未有的挑战。可见光通信(VLC)技术因其具有频带资源丰富、强抗电磁干扰、高保密性等优点而备受关注^[1-3]。2007年,西安理工大学的丁德强等人^[4]开创性地设计了室内光通信的传输模

收稿日期:2023-05-15。

基金项目:国家自然科学基金项目(批准号:62265010、61875080、62261033)资助。

作者简介:曹明华(1979—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为无线光通信理论、光无线融合技术等。主持国家自然科学基金面上项目1项、地区项目1项,主持或参与完成了国家自然科学基金、“863”课题、甘肃省自然科学基金、甘肃省教育厅高等学校科研项目及横向项目共计10余项。



型,深入分析了布局设计与接收光功率之间的关联,最终得出了4个通信光源的最优布局方案。2011年,中科院杨宇等人^[5]设计出了一种基于18×1 W大功率发光二极管(LED)的VLC系统,实现了90 kb/s的通信速率。2018年,无线光通信与网络研究中心XU J J等人^[6]提出了基于智能手机相机和LED的厘米级定位系统,为VLC技术的应用开拓了新领域;2019年,YANG Y F等人^[7]设计出一种基于单光源的全双工VLC系统,证实了单光源完全有能力构建全双工可见光链路。2021年,卢霆威等人^[8]将可见光传输技术与以太网相结合,设计了满足以太网技术要求的电路系统,并实现了以太网的全双工光通信。

另一方面,超奈奎斯特(FTN)技术^[9-11]通过压缩发送符号的时域或频域间隔,实现了在单个码元周期内发送多个符号的目的,从而显著提高了数据传输速率

曹明华,王效兵,陈鹏宇,等:一种基于FPGA的FTN-VLC系统设计与测试

和通信效率。2013年,复旦大学ZHANG J等人^[12]提出了一种光纤中的数字FTN信号生成方案,该方案的光信噪比(OSNR)损失仅为1.5 dB。随后,张智禹^[13]将FTN技术引入光纤通信领域,设计了FTN系统,并深入分析了FTN光通信系统的优势和技术难题。

基于上述研究,若能将FTN技术成功引入VLC系统中,将有望打破奈奎斯特第一准则对系统传输速率的限制,从而进一步提升系统的有效性和频谱利用率。尽管在将FTN技术融入VLC系统的研究领域已取得了一定的进展,但设计和实现低成本的可见光FTN通信系统仍然面临诸多挑战。因此,本文选择以峰值波长为660 nm的红光LED作为半导体激光器,并借助现场可编程门阵列(FPGA)开发平台,将FTN技术融入VLC系统中,设计一种低成本的FTN-VLC系统。

1 系统组成与原理

FTN-VLC系统由三部分组成,分别为信号发送端、接收端和电源模块,具体如图1所示。

信号发射端主要由FTN信号成型模块和FTN信号发射模块构成。其中,FTN信号成型模块的核心组件为用户数据终端和FPGA处理器,负责调制和抽样FTN信号;而FTN信号发射模块则包括数/模(D/A)转换器、低通滤波器、电压放大器和半导体激光器,其中半导体激光器为红光激光二极管(LED)。在信号发射过程中,首先由D/A转换器将FPGA处理器输出的数字信号转换为模拟信号,随后通过低通滤波器滤除转换过程中产生的噪声。最后,电压放大器将微弱的输入电压放大至红光LED的线性工作范围,从而确保信息能够成功发射出去。

信号接收端主要由FTN信号接收模块和信号比较判决模块组成。其中,FTN信号接收模块包括雪崩光电二极管(APD)、电流/电压(I/V)转换器、低通滤波器

和电压放大器;而信号比较判决模块主要由电压比较器组成。APD的主要职责是接收红光LED发出的光信号,并将其转换为电流信号。随后,I/V转换器将这一电流信号转换为后期处理所需的电压信号。低通滤波器则用于滤除转换过程中和在大气信道传输时引入的噪声。最后,电压放大器将信号放大,并将其发送至电压比较器进行比较和判决。

电源模块主要负责对输入220 V交流电压进行整流、降压处理,并多端口输出 ± 5 V、 ± 10 V电压,为各模块提供所需电源。

2 系统收发端硬件电路设计

2.1 D/A转换器

采用FTN技术进行传输前,需要将数字信号转换成模拟信号。此转换过程依赖于德州仪器公司的DAC902芯片作为主控芯片。这款芯片具备12位分辨率和超过165 MS/s的更新速率,当使用单电源+5 V供电时,其功耗可低至170 mW。为了确保电路的稳定性,本文在系统设计中选用了10 μ F的电解电容和0.1 μ F的瓷片电容来消除外部电源引入的噪声。此外,由于信号源的阻抗较低,本文加入了阻抗匹配电阻以改善匹配情况,从而减少反射和避免振荡。

2.2 低通滤波器

由于D/A转换器的输出信号噪声严重,且输出电压限制在1.25 V以内,因此设计滤波模块变得至关重要。滤波模块不仅要能有效去除噪声,还需对信号进行放大。在发射端,本文选用Linear Technology公司生产的LT660-10型低通滤波器。这款滤波器具有10 MHz的截止频率和3.1倍的放大增益,能够很好地完成上述任务。另一方面,接收端从I/V转换器输出的电压信号中也存在噪声问题。这些噪声主要来源于光信号在大气信道中传播时引入的干扰和I/V转换器本身产生的噪声。为了解决这一问题,本文在系统接收端选用

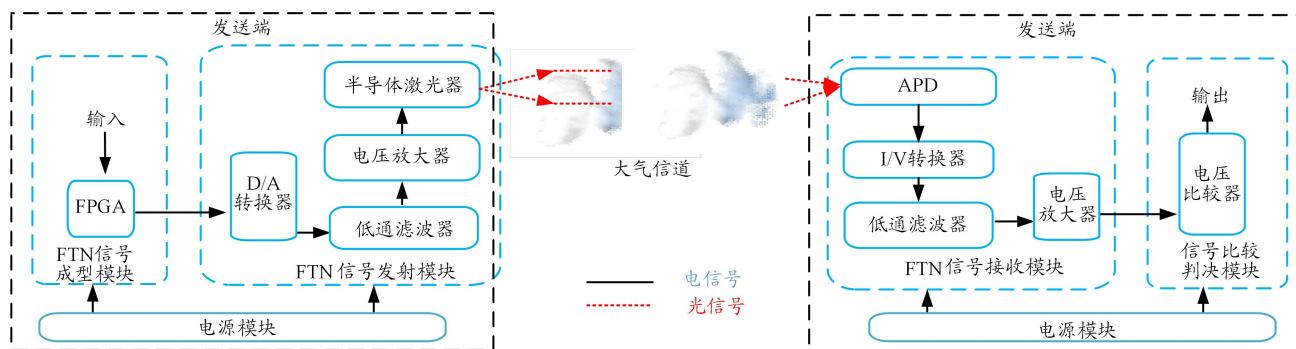


图1 FTN-VLC系统框图

TEXAS INSTRUMENTS 公司生产的 LTC1568 型滤波器。这款滤波器是两级级联的 4 阶巴特沃斯型滤波器, 具有更低的噪声和更高的信噪比(支持 90 dB 以上的信噪比), 其截止频率为 10 MHz, 从而确保信号的纯净度和准确性。

2.3 电压放大器

在发送端, 由于滤波模块的输出端电压为 0~4 V, 而 LD 模块的工作电压为 6~10 V, 因此需将电压信号放大至 LD 的线性工作区。本文选择德州仪器公司生产的 THS3001 作为主控芯片, 其放大倍数范围为 2.5~3.3 倍。为了控制 LD 的输出功率, 本文在电压放大器的输出端并联电阻以调节放大器输出端的电压。

在接收端, 从滤波器输出端的电压为毫伏级, 需要电压放大器将其放大到伏级再进行判决。考虑到电压放大器的选取需与传输信号的带宽相匹配, 同时要求其压摆率尽量大, 本文选择了 OPA657 放大芯片来完成这一功能。该芯片具有 1.6 GHz 的增益带宽积和 700 V/ μ s 的压摆率, 可提供高于 10 MHz 的信号带宽。

2.4 半导体激光器和光电探测器

在系统中, 选择适当的半导体激光器是一个至关重要的环节, 因为它对系统的传输距离和衰减特性具有显著影响。鉴于红光在短距离通信中展现出卓越的抗噪声性能^[14-15], 本文采用 Marktech Optoelectronics 公司生产的红光 LD 作为信号发射源, 其峰值发射波长为 660 nm, 正向电流为 50 mA。这款 LD 的额定输出功率达到 120 mW, 且响应时间仅为 20 ns。

在选择光电探测器时, 必须确保其与红光 LD 的中心波长(660 nm)相匹配。因此, 本文未选用 PIN 光电二极管, 而是选用北京敏光科技有限公司制造的 LSSAPD9-500 型雪崩二极管(APD)。这种 APD 不仅具有高响应速率, 还能探测到波长为 400~1 000 nm 的光信号^[16-17]。

2.5 I/V 转换器

APD 能够实现光信号到电流信号的转换。为便于后续的电电压信号处理, 本文设计的 I/V 转换器电路如图 2 所示。该电路选用低噪声的 OPA657 芯片来实现 I/V 转换功能, 将输入的电流值转换成对应的电压值输出。

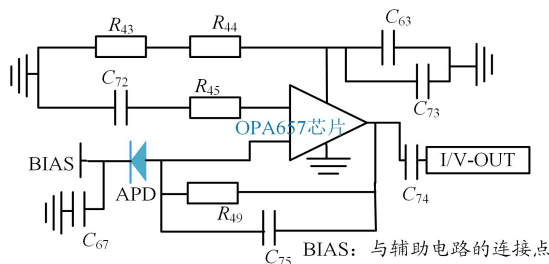


图 2 I/V 转换电路

该 I/V 转换器采用了电压反馈的形式, 且反馈网络以并联方式连接。当运放采用负反馈连接时, 电路通常会工作在深度负反馈区域。如果此时输入信号的频率过高, 芯片内部晶体管之间的极间电容会产生附加相位移, 从而引发电路的自激振荡, 干扰信号传输。因此, 电路中采用了密勒补偿电容 C_{75} , 将主极点移至低频, 从而消除自激。

由于选用 APD 作为光电探测器, 本文设计了多级增压电路如图 3 所示。该电路使用二极管 $D_1 \sim D_7$ 以及电容 $C_{11} \sim C_{13}$ 、 $C_4 \sim C_3$ 组成多级倍压电路^[18], 对电压进行放大, 以达到 APD 所需的 103 V 反向偏置电压, 使其能够正常工作。

在多级增压电路中, 为防止输出电压中的纹波信号过大而损坏二极管, 本文将由电感 L_2 、 L_3 和电容 C_9 、 C_{10} 组成的 π 型滤波器放置在反馈电压之后, 以确保滤波器能够有效去除输出电压中的纹波信号, 从而提高电路的可靠性。

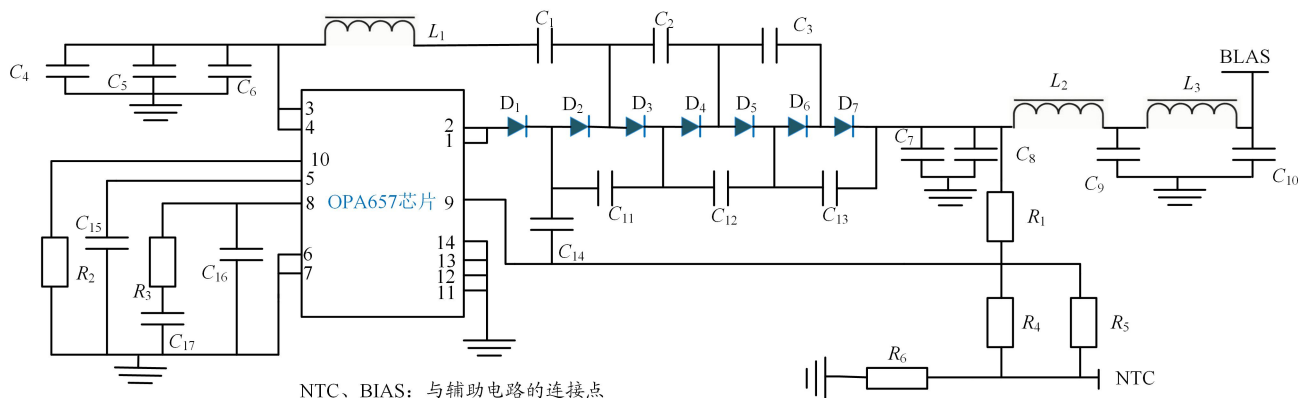


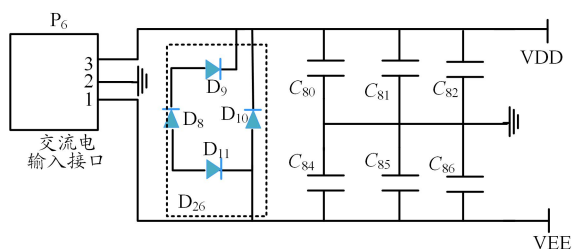
图 3 多级增压电路

2.6 电压比较器

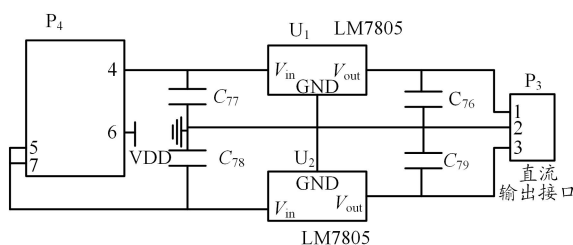
本文采用德州仪器生产的 TLV3501 型轨至轨高速比较器芯片作为电压比较器的核心控制元件,该芯片具有将模拟信号转化为二进制信号的功能^[19]。这种比较器的延迟时间仅为 4.5 ns。当输入电压与串联电阻相连,并且输入电压超过 300 mV 时,会触发过压保护机制。此时,串联电阻可将输入电流限制在 10 mA^[20]以内,从而防止对芯片造成损害。

2.7 电源系统

电源电路图如图 4 所示。该电路输入的交流电压为 220 V。为了满足发射端和接收端中各模块对直流低压电源的需求,本文首先使用由 4 个二极管 ($D_8 \sim D_{11}$)组成的整流器 D_{26} 将交流电压转化为直流电压,随后通过降压电路进一步调整,以满足各模块的具体电压要求。接着,选用德州仪器公司生产的 LM7805 作为低压线性稳压器,其输出噪声电压仅为 42 μV 。为了降



(a) 交流变直流电路



(b) 低压线性稳压电路

图 4 电源电路

低外部电源引入的噪声,在芯片的输入和输出端分别加入了多个电解电容和瓷片电容。经过整流和降压处理后,该电路能够从多个端口输出 $\pm 5\text{ V}$ 、 $\pm 10\text{ V}$ 的电压。

3 软件设计与仿真分析

3.1 软件设计

FTN 信号的成功设计成型是一个至关重要的因素。在设计过程中,本文采用了根升余弦滤波器来生成信号脉冲,并通过直接数字频率合成技术来生成 FTN 信号。图 5 为 FPGA 中实现的电阻晶体管逻辑 (RTL) 电路图,该电路包含多个关键模块:信号产生 (Issp) 模块、串口发送 (Uart_byte_tx) 模块、按键过滤 (Key_filter) 模块、并/串转换 (Serial_parallel) 模块、二进制信号到根升余弦信号的转换 ($U_0 \sim U_7$) 模块、FTN 信号成型 (Chaonai-add) 模块和解调 (Jietiao) 模块。当 Key_filter 模块的输入端 Key-in0 接收到信号时, Uart_byte_tx 模型的使能端 Send_en 会被激活,随后 Serial_parallel 模块将接收到的 8 位二进制信号进行并/串转换并发送出去。接收端在接收到信号后,经过解调和抽样判决,最终恢复出发送端的原始信号。

3.2 仿真分析

本文使用 ModelSim 软件对系统进行了仿真分析,系统仿真波形如图 6 所示。

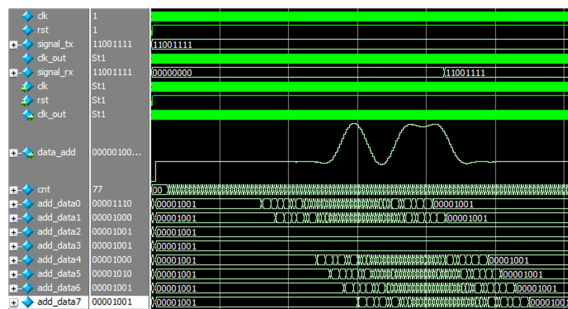


图 6 系统仿真波形图

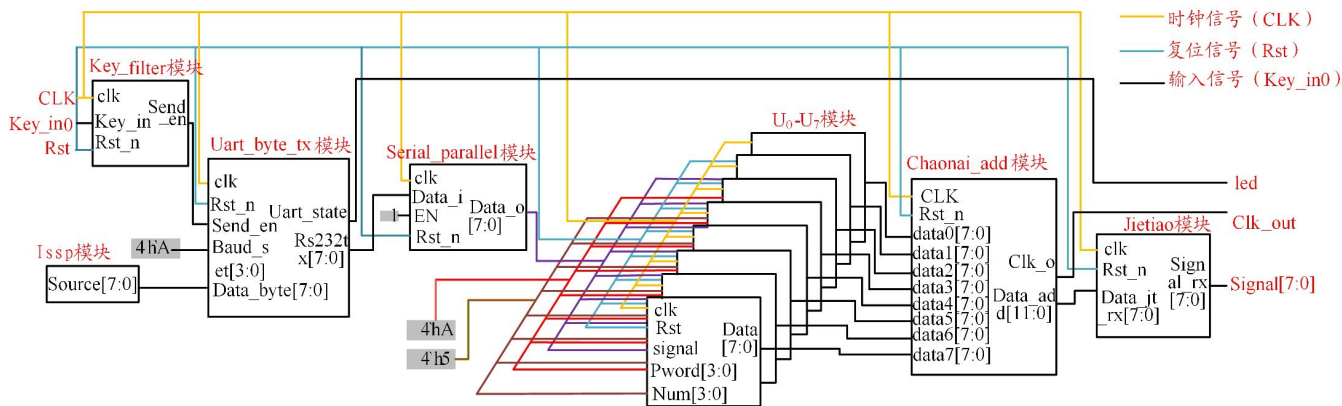


图 5 FTN-VLC 系统 RTL 电路示意图

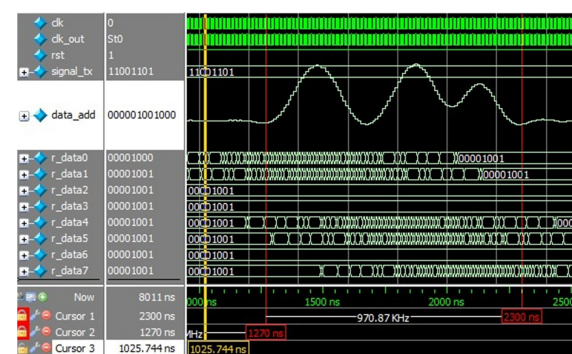
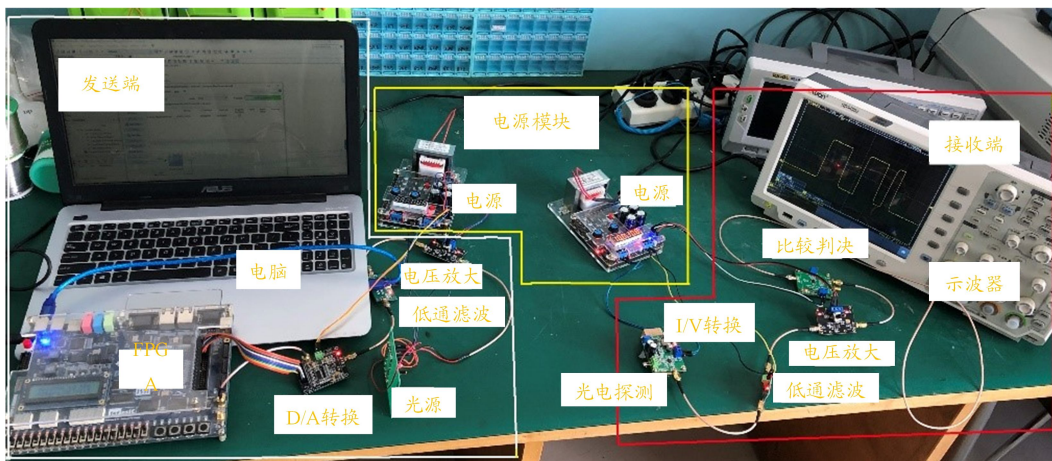
signal_tx 表示发送的 8 位二进制信号。add_data0、...、add_data7 则分别表示这些二进制信号所对应的 FTN 信号。data_add 是由 8 个 FTN 信号叠加形成的综合 FTN 信号。cnt 是对 data_add 信号的计数。在接收端,通过对 data_add 信号进行抽样判决,可以恢复出二进制数字信号 signal_rx。从图 6 可以看出,发送信号 signal_tx 与接收信号 signal_rx 保持一致。

在信号的抽样判决过程中,当 FTN 信号 data_add 的幅值发生变化时,它开始传递信号,并对这部分信号进行 87 次计数。随后,在每个码元对应根升余弦信号的波峰附近进行 3 次采样。例如,第一次在 cnt-num 为 81、82、83 时采样;第二次在 cnt-num 为 8c、8d、8e 时采样;以此类推。当发送 8 个码元时,总共需要采样 24 次。每经过 3 次采样,进行一次判决,生成一个输入信号位,并更新经过判决的信号 signal_pj_rx。当所有 8 个输入信号位都完成判决后,将最终的判决结果显示并输出为 signal_rx。

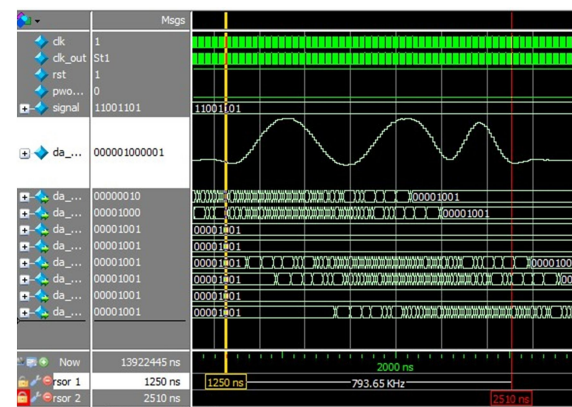
采用 FTN 技术和奈奎斯特技术传输信号时的频谱效率仿真图如图 7 所示。从图 7(a)可以看出,当发送符号序列为 11001101 时,采用 FTN 技术传输一次占用的频谱带宽为 970.87 kHz,而采用奈奎斯特技术传输时所占用的频谱带宽仅为 793.65 kHz。因此,与奈奎斯特技术相比,采用 FTN 技术的频谱利用率提高了 18.25%。

4 硬件测试与评估

为了验证所设计系统的可靠性和实际性能,本文搭建了一个硬件平台,如图 8 所示。该平台与之前的软件仿真系统的主要参数保持一致,并设定传输距离为 0.5 m,数据传输速率为 10 Mb/s。在发送端,FPGA 负责调制输入信息,并通过红光 LD 将其发射到大气信道中。在接收端,光信号经 APD 接收、I/V 转换和滤波器的处理后,可以有效消除转换过程和大气信道中的噪声。随后,电压放大器对信号进行放大,并送至电压比较器中。最终,通过连接在比较器后的示波器可以观察并分析接收到的信号。



(a) FTN 技术



(b) 奈奎斯特技术

图 7 采用 FTN 技术和奈奎斯特技术传输信号时的频谱效率仿真图

4.1 测试 FTN 信号的构建

将示波器连接到发送端滤波器的输出端后,观察到的结果如图 9 所示。当发送二进制信号 1 时,示波器显示的 FTN 信号波形如图 9(a)所示,呈现出典型的 Sinc 波形特征;而当发送二进制信号 0 时,对应的 FTN 信号波形如图 9(b)所示,其形状近似为一条直线。这些实际测试结果与之前的仿真结果相吻合,特别是在波形、幅度和频率等方面,验证了本文提出的利用 FPGA 生成 FTN 信号的可行性。

图 8 试验测试系统

曹明华,王效兵,陈鹏宇,等:一种基于FPGA的FTN-VLC系统设计与测试

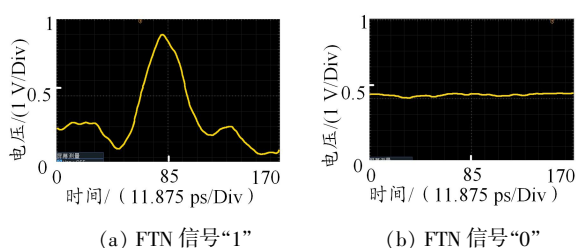


图9 发送端信号测试

4.2 系统收发端测试

系统中的信号经 0.5 m 大气信道传输后,将示波器连接到电压比较器的输出端进行测试。当循环发送二进制数序列为 11001101 时,每个码元叠加所对应的 FTN 波形如图 10(a)所示。将示波器接在接收端的电压比较器输出端,观察到的信号波形如图 10(b)所示,该波形中的高低电平变化直接对应于发送的二进制数序列 11001101。通过对比波形与二进制序列,验证了接收端与发送端信号的一致性,并成功实现了对信号的解调与识别。

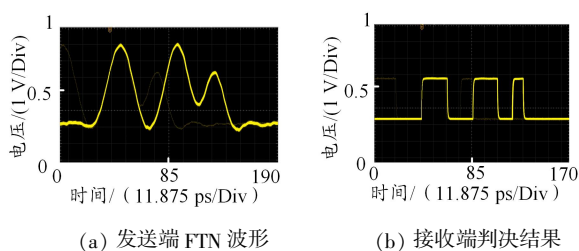


图10 系统收发端测试结果图

5 结束语

本文设计了一种基于FPGA的FTN-VLC系统,该系统主要采用了DAC902E芯片作为D/A转换器、LT6600芯片作为低通滤波器、THS3001芯片作为电压放大器,以及TPS55340芯片作为I/V转换器。经过实验平台测试,当传输距离为0.5 m时,该系统能够实现稳定且高速的数据传输,速度达到10 Mb/s。与传统的VLC相比,引入FTN技术后,该系统的频谱利用率提高了18.25%,可广泛应用于无线通信、室内定位和环境监测等多种VLC场景。

参考文献:

[1] LV W L, YAN W. Voice transmission system based on visible light com-

munication technology[J]. International Core Journal of Engineering, 2021, 7(7): 419-427.

[2] CHEN Y, REN Z M, HAN Z, et al. LED based high accuracy indoor visible light positioning algorithm[J]. Optik, 2021, 243: 166853-22-166853-24.

[3] WU J B, AHMED H S, MUHAMMAD I, et al. Li-pos: a light positioning framework leveraging OFDM for visible light communication [J]. Sensors(Basel, Switzerland), 2021, 21(13): 4310-1-4310-14.

[4] 丁德强,柯熙政,李建勋. VLC 系统的光源布局设计与仿真研究[J]. 光电工程, 2007(1): 131-134.

[5] 杨宇,刘博,张建昆,等. 一种基于大功率 LED 照明灯的 VLC 系统[J]. 光电子·激光, 2011, 22(6): 803-807.

[6] XU J J, GONG C, XU Z Y. Experimental indoor visible light positioning systems with centimeter accuracy based on a commercial smartphone camera[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(6): 1-17.

[7] YANG Y F, JIANG M Z, ZHANG Y, et al. Design of full duplex visible light communication system based on single light source [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(1): 1-9.

[8] 卢霆威,王泽平,刘梦,等. 基于 VLC 技术的全双工以太网通信系统设计[J]. 电子学报, 2022, 50(1): 45-53.

[9] 李双洋,白宝明,马啸. FTN 传输技术:现状与挑战[J]. 电子学报, 2020, 48(1): 189-197.

[10] 张将. FTN 信号关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2017.

[11] LIU L M, LI S, LI Q, et al. Faster-than-Nyquist signaling based adaptive modulation and coding [C]/IEEE. Proceedings of 2018 10th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Hangzhou: IEEE, 2018: 1-5.

[12] ZHANG J, YU J, CHI N. Generation and transmission of 512-Gb/s quad-carrier digital super-nyquist spectral shaped signal[J]. Optics Express, 2013, 21(25): 31212-31217.

[13] 张智禹. FTN 无线通信系统优化设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2022.

[14] 曹明华,张伟,王惠琴,等. FTN 无线光通信中的逐点消除自适应均衡算法[J]. 光学学报, 2020, 40(24): 46-53.

[15] 王惠琴,马玉昆,蔡红亮,等. 无线激光数据通信系统收发电路的设计与实现[J]. 兰州理工大学学报, 2021, 47(3): 91-96.

[16] 王献合, 张国平. 基于 InGaAs-APD 的爆炸起爆远距离探测系统的设计[J]. 信息技术, 2019(10): 15-20, 26.

[17] 向雨琰,郭守罡,伍煜,等. 一种高精度低功耗的 APD 偏置电压模块设计[J]. 半导体光电, 2021, 42(4): 556-561, 567.

[18] 王博,曹明华,马玉昆,等. 无线光高清视频传输系统的设计[J]. 数字通信世界, 2021(6): 85-87, 105.

[19] WANG B, CAO M H, MA Y K, et al. Design of wireless optical high-definition video transmission system [J]. Digital Communication World, 2021(6): 85-87, 105.

[20] 李冬,孙金中,莫啸. 一种高速低失调比较器电路设计[J]. 中国集成电路, 2022, 31(7): 37-40, 69.