

基于可见光通信技术的全双工以太网通信系统设计

卢霆威¹, 王泽平¹, 刘 梦¹, 刘青青², 陈 兵³, 林 岳¹, 吴挺竹¹, 陈 忠¹

(1. 厦门大学电子科学与技术学院, 福建厦门 361005; 2. 中国移动通信集团福建有限公司厦门分公司, 福建厦门 361005;
3. 福建越众科技发展有限公司, 福建福州 350000)

摘 要: 利用可见光通信技术来传输以太网信号能够克服传统无线通信速率低、频谱资源紧张、使用场景受限等缺点. 针对传统的可见光通信系统难以实现高速以太网通信的问题, 本文设计了满足以太网技术要求的全双工可见光通信系统. 系统主要包括以太网接口处理电路、差分转单端、单端转差分电路、光源驱动电路、光电检测电路, 上、下行链路都采用可见光通信技术对以太网信号进行透明传输, 无须调制即可实现高速以太网通信. 经测试, 本系统可在通信距离为 10 m 的情况下实现 100 Mbps 以太网的全双工通信.

关键词: 可见光通信; 以太网; 激光传输; 全双工通信; 硬件电路

中图分类号: TN929.14 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2022)01-0045-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20210244

Full-Duplex Indoor Ethernet Communication System Based on Visible Light Communication

LU Ting-wei¹, WANG Ze-ping¹, LIU Meng¹, LIU Qing-qing², CHEN Bing³, LIN Yue¹,
WU Ting-zhu¹, CHEN Zhong¹

(1. School of Electronic Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China;
2. Xiamen Branch of China Mobile Communications Group Fujian Co., Ltd., Xiamen, Fujian 361005, China;
3. Fujian Yue Zhong Science and Technology Development Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350000, China)

Abstract: Using visible light communication technology to transmit Ethernet signals can overcome the disadvantages of traditional wireless communication, such as low communication rate, tight spectrum resources and restricted application scenarios. Aiming at the problem that the traditional visible light communication system is difficult to realize the bidirectional Ethernet communication, this paper designs a full duplex visible light communication system to meet the technical requirements of Ethernet. This system mainly includes Ethernet extraction circuit, differential to single-ended circuit, single-ended to differential circuit, drive circuit and photoelectric detection circuit. Visible light communication technology is used to transmit Ethernet signals transparently in the both uplink and downlink of the system, which can realize high-speed communication without modulation. The experimental results show that the system can realize 100Mbps Ethernet full duplex communication under the condition of 10 meters communication distance.

Key words: visible light communication; Ethernet; laser transmission; full duplex communication; hardware circuit

1 引言

随着照明技术以及无线通信技术的快速发展, 可见光通信(Visible Light Communication, VLC)技术将是下一代光通信的主流方向^[1-5]. 可见光通信不仅拥有当前射频通信无可比拟的频谱资源与通信速度, 而且它在传输过程中的安全性、环保性、绿色性等优势特点使得可见光通信技术有着广阔的应用前景^[6-10]. 然而, 目

前大多数对可见光通信的研究都是停留在实验理论验证阶段, 很少将其应用到实际生活中^[11].

以太网是目前使用广泛、表现最出色的通信标准^[12], 已经充分融入了人们的生活中. 当下使用有线传输的方式进行以太网通信依然会受到物理线缆的固有限制, 而使用 Wi-Fi 技术来传输以太网虽然已经相对成熟, 但是在一些特定的场合之下依然会存在一定问题.

例如在室内环境下,处于邻近频段的多种无线通信系统的信号会彼此干扰,从而造成 Wi-Fi 在室内传输时同频干扰严重,极大影响传输质量;而在室外短距通信的场景下,IEEE 802.11 标准的发射功率则可能满足不了通信的要求^[13],这一缺陷将会导致在救灾抢险、地质考察等重要场景下无法通信。因此,利用可见光通信技术来代替传统的微波通信技术传输以太网能够很大程度地解决以上问题。

利用可见光通信技术来传输以太网信号需要搭建双向通信链路^[14],但是当下研究基于可见光的双向通信的速率依然是一个技术难点。在目前使用可见光通信技术进行双向通信的研究中,大多是在下行链路中使用发光二极管(Light-Emitting Diodes, LED)作为光源来传输数据^[15,16],而上行链路一般是使用包括蓝牙、红外等在内的其他无线通信方法来完成数据的上传,速率往往较低,并且存在通信链路不稳定等缺点^[17]。虽有文献利用“猫眼”逆向调制器对下行链路光信号进行两次调制实现了单光源双向通信^[18],但是速率很低。上述问题使得基于可见光的全双工通信技术难以传输高速以太网,进而应用到日常家庭生活中。因此,设计一种能够对高速以太网信号进行高效、远距离传输的全双工可见光通信系统具有十分重要的意义。

为了解决以上问题,本研究设计了基于可见光通

信技术的全双工以太网通信系统。本系统能够安装在用户家中,代替传统的光纤与无线通信,实现入户光猫与固定家用设备之间的数据传输,且速率方面要求能够传输 100 Mbps 以太网。同时为了避免激光对人眼的损伤,系统将安装在用户家中人眼无法从正面直视的位置,例如天花板上。整体系统的上行和下行链路工作原理相同。经测试,可实现通信距离为 10 m 情况下的 100 Mbps 以太网全双工通信。比起传统的全双工以太网通信系统,本文系统可以承载并处理以太网信号,将可见光通信技术真正应用到实际中,并拥有较高的上、下行传输速率。同时,本系统基于企业产业化要求设计,成本较低,可应用于电脑、数字网络电视等数字终端的高速、远距离联网通信。

2 系统链路结构

基于可见光通信技术的全双工以太网通信系统如图 1 所示。该系统由近端、远端两个部分组成。近端以连接到网络运营商的以太网光猫作为终端来发送和接收数据,而远端则连接家用设备进行数据的上传和下载。近端和远端的硬件构成完全相同,都包括光源及其驱动电路、光电检测电路、差分转单端电路、单端转差分电路、以太网信号提取电路,系统工作时,两端同时进行数据的发送与接收,由此构成全双工通信。

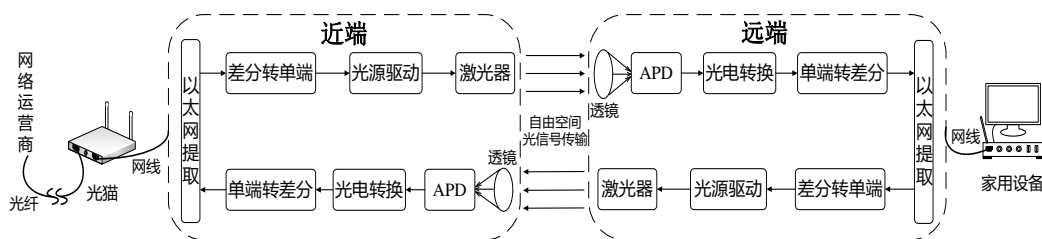


图1 本文全双工可见光通信链路

由于目前市售的LED调制带宽太小^[19],不足以进行高速通信,且LED为发散光源,在进行全双工通信时,上下行链路的LED光源同时点亮将会造成串扰,无法满足高速长距离的通信需求。因此本系统选用高带宽的红色激光器作为上下行链路的发射光源来传输信号。接收端则采用对短波长光响应速度快、灵敏度高的雪崩光电二极管(Avalanche Photodiode, APD)作为光电探测器^[20],并在探测器前加入透镜来汇聚光线,以增加通信距离。

现介绍该系统的通信过程。在下行链路中,近端模块将以以太网的三阶基带编码(Multi-Level Transmit-3, MLT-3)信号从自身的网口经RJ-45端口进入以太网提取电路,经过滤波和耦合后经过以太网信号提取电路进入差分转单端电路,从而将以以太网信号转化为可加载到光源上的单端信号,随后该单端信号通过光源驱

动电路加载到激光上,激光器将其承载的光信号传输到远端的APD探测器中,探测器与光电转换电路将光信号转换为电信号后,再通过单端转差分电路,将单端信号还原为设备可识别的双端以太网信号,进入接口处理电路,将信号传入远端的家用设备,至此完成下行链路通信。同时,上行链路的信号由远端家用设备发出,经由与下行链路相同的过程将数据发送给近端网口。由此实现基于可见光通信技术的全双工以太网通信。

3 系统硬件电路设计

3.1 光源驱动电路设计

光源驱动电路的主要功能是将信号加载至光源上,实现电信号到光信号的转换。本系统的光源驱动电路如图2所示。该电路包括放大和偏置两个部分。在交

流信号输入端口后端由 $R1$ 和 $C1$ 构成滤波电路,滤除信号噪声. $R2$ 与 $R3$ 的比值决定了输入的静态工作点,使光源稳定工作在线性区间,从而保证输出的交流信号无失真. 电路放大部分将交流信号进一步放大,并且将直流信号和交流信号一起加载到光源两端,完成信号的发射.

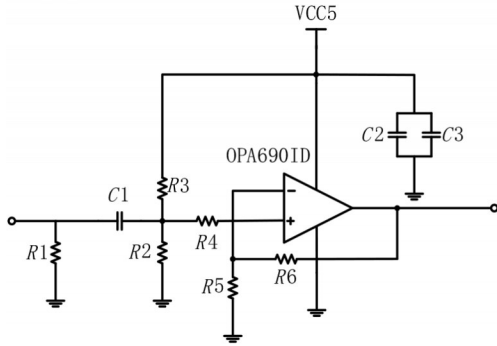


图2 光源驱动电路

3.2 光电检测电路设计

在可见光通信系统中,光电检测电路的主要功能是利用光电探测器将接收到的光信号转化为电信号并进行处理. 本系统采用 APD 作为光电探测器. 由于 APD 的反向击穿电压较高,普通电源难以提供,因此该电路需要使用电压倍增技术. 同时,在 APD 将所检测的光信号转换为电流信号后,系统还需要将其转换为设备可识别的电压信号,需设计高速 I-V 转换电路.

3.2.1 开关电源 boost 电路

本系统采用的 APD 的反向击穿电压接近 95V,故采用自举升压二极管、自举升压电容等电子元件使电容放电电压和电源电压叠加,对电压进行多级放大. 单级升压电路原理图如图 3 所示.

图中的三极管 K 充当开关,若忽略二极管 D 两端的导通压降,当三极管 K 导通时,电感电压:

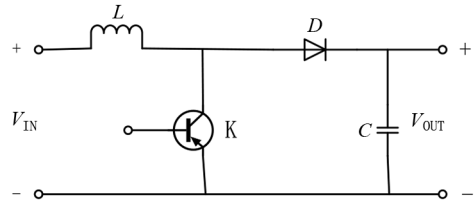


图3 单级升压电路

$$V_{IN} = L \frac{di_L}{T_{ON}} \quad (1)$$

其中 T_{ON} 为开关管导通时间,当 K 断开时,电感电压:

$$V_{OUT} - V_{IN} = L \cdot \frac{di_L}{T_{OFF}} \quad (2)$$

其中 T_{OFF} 为开关管断开时间,根据伏秒平衡原则,开关导通和开关断开流过电感的电流大小相等,则占空比:

$$D = \frac{T_{ON}}{T_{OFF} + T_{ON}} = \frac{L \frac{di_L}{V_{IN}}}{L \frac{di_L}{V_{IN}} + L \frac{di_L}{V_{OUT} - V_{IN}}} = \frac{V_{OUT} - V_{IN}}{V_{OUT}} \quad (3)$$

进而得出经过单级升高后的电压大小为

$$V_{OUT} = \frac{V_{IN}}{1 - D} \quad (4)$$

由于本系统所需升压较高,故需要采取多级升压电路. 系统的升压电路采用德州仪器公司(Texas Instruments, TI)的 TPS55340 开关电源芯片,开关频率可在 100~1200 kHz 之间调节. 整体多级倍压电路原理图如图 4 所示. 原理图中的电容 $C_6, C_7, C_8, C_{10}, C_{11}, C_{12}$ 与二极管 $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6, D_7$ 共同对电压进行放大. 其中,电容除了起到储能作用之外,还对每两个二极管之间电压起到均衡作用,二极管在开关管断开时起到续流作用,防止烧坏芯片. L_2, L_3, C_{15}, C_{16} 组成的 π 型滤波在布局的时候放在反馈电压之后,以防止输出纹波过大导致升压时间常数过大,烧坏二极管.

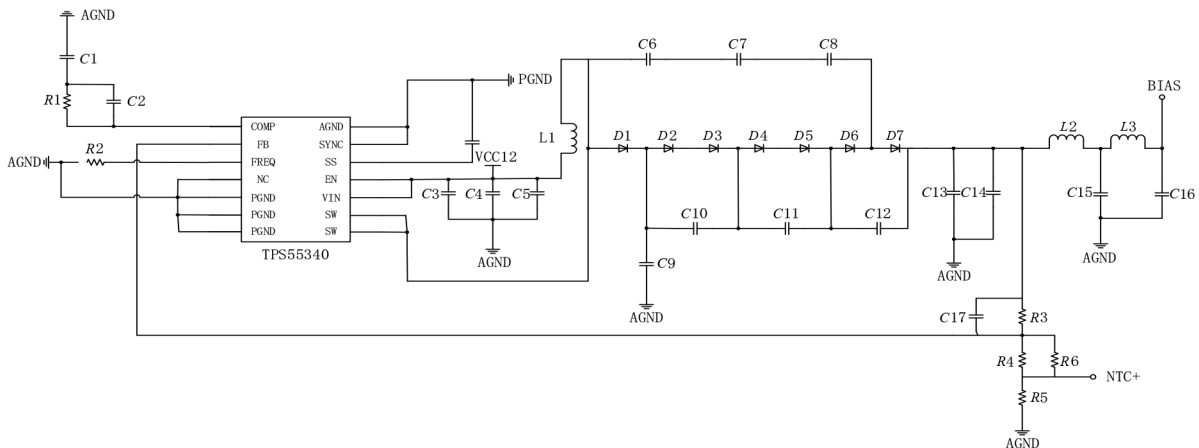


图4 多级倍压电路

该电路还需要考虑的是, APD 的击穿电压会随着环境温度的增加而增加, 如果系统在工作时环境温度变化较大, 可能会导致电路不稳定. 为解决该问题, 本电路加入了温度补偿模块. 多级倍压电路的输出电压为

$$V_{\text{BIAS}} = V_{\text{REF}} \times \left(1 + \frac{R_4 // R_5}{R_6 // R_7} \right) \quad (5)$$

其中 V_{REF} 为开关电源芯片内部提供的定值电压. R_7 为负温度系数热敏电阻, 随着温度的增加阻值降低. 当环境温度上升时, R_7 的阻值下降, 多级倍压电路输出电压上升, 这样就补偿了由于温度变化造成的 APD 所需击穿电压的变化.

经测试, 多级倍压电路的输出端电压稳定在 95 V, 可以使系统所用 APD 正常工作.

3.2.2 高速 I-V 转换电路

APD 在工作时将接收到的光信号转换为电流信号, I-V 转换电路的作用就是将这个电流信号转换为电压信号并进一步处理, 使终端的网口或是设备能够识别该信号并进行电平判决. 由于本系统应用于高速通信场景, 因此要求 I-V 转换电路具有较高的增益带宽积. 该 I-V 转换电路采用具有低噪声、高增益带宽积的芯片 OPA657U. 电路原理图如图 5 所示.

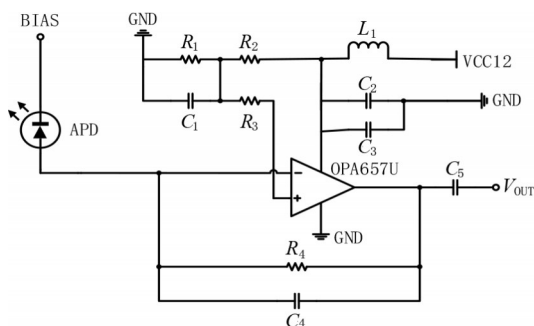


图 5 高速 I-V 转换电路

本 I-V 转换电路采用电压并联负反馈的形式, 将 APD 产生的电流信号稳定转换为电压信号. 其中 R_4 为该转换电路的核心电阻, 交流输出电压公式为

$$V_{\text{OUT}} = -I \times R_4 \quad (6)$$

需要注意的是, 当运放反馈的方式为负反馈时, 电路在工作情况下一般会进入深度负反馈状态, 若此时信号频率过高, 则芯片内部晶体管的极间电容起到的作用不容忽视, 在某个频率点会产生附加相移 $n\pi$, 导致本来在该频点的负反馈变为正反馈, 电路开始出现自激振荡, 从而干扰正常信号的传输, 因此电路采用密勒补偿电容 C_4 将主极点向低频移动以消除自激. 从芯片输出的电信号经 C_5 进行交流耦合输出至下一模块.

3.3 信号转换电路设计

由网口直接输出的以太网信号需要通过电路进行提取之后, 才能进一步处理以满足系统需要. 另外, 以太网信号是一个差分信号, 而在可见光通信技术中, 加载到光源两端的信号必须是单端信号, 因此需要设计电路将差分信号转换为单端信号. 同时, 输入设备或者以太网网口的信号必须为差分信号, 因此在光电检测电路之后必须设计将单端信号转换为差分信号的模块. 基于以上考虑, 信号转换电路的设计分为以太网信号提取电路、差分转单端电路以及单端转差分电路三个部分.

3.3.1 高速 I-V 转换电路

以太网信号提取电路的作用是直接将以太网物理层差分信号提取出来进行通信, 而无须经过发送端编码映射、数字调制以及接收端的解映射、解调等复杂的信号处理操作, 从而得以简化系统结构并减小信噪比损失. 图 6 是本系统的以太网信号提取电路原理图. 采用带有网络变压器的 RJ45 接口 HR911105 作为以太网信号的输入接口. 在进行下行链路通信时, 以太网信号由 T+、T- 端进入接口, 经处理后, 提取的信号由 R+、R- 端输入下级电路模块. 在进行上行链路通信时, 由设备上传的信号由 R+、R- 端进入接口, 经由本模块处理为以太网口可识别的信号, 并从 T+ 和 T- 端传回以太网口.

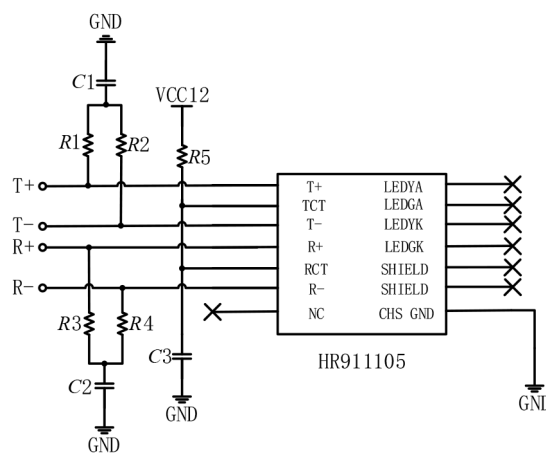


图 6 以太网信号提取电路

3.3.2 差分转单端电路设计

本系统的差分转单端电路的设计芯片采用差分接收器放大芯片 AD8130, 它的 -3 dB 带宽达到 270 MHz, 且在高频工作时仍然具有极高的共模抑制比. 因此非常适用于高速差分信号传输. 图 7 是本系统的差分转单端电路原理图.

经提取的以太网信号从 $V_{\text{IN}+}$ 和 $V_{\text{IN}-}$ 端进入电路, 从 V_{OUT} 端输出, 输出信号计算式为

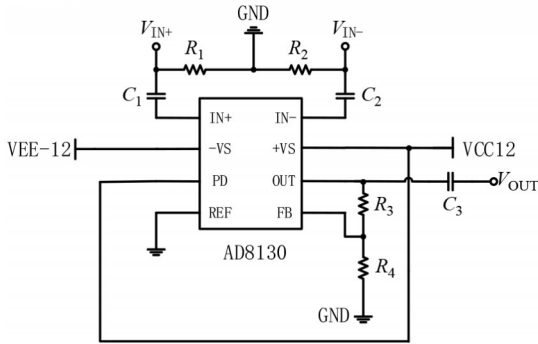


图7 差分转单端电路

$$V_{OUT} = (V_{IN+} - V_{IN-}) \times \left(1 + \frac{R_3}{R_4} \right) \quad (7)$$

3.3.3 单端转差分电路设计

本系统的单端转差分电路采用低失真差分 ADC 驱动器 AD8138 作为核心芯片,其-3 dB 带宽达到 320 MHz,压摆率达到 1150 V/us,具有低谐波、低失真等优点.设计原理图如图 8 所示.

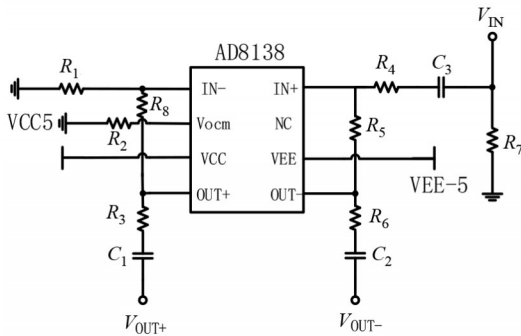


图8 单端转差分电路

由光电转换电路输出的信号由 V_{IN} 端输入电路,经处理后由 V_{OUT+} 和 V_{OUT-} 端输出差分信号.输出的差分信号大小为

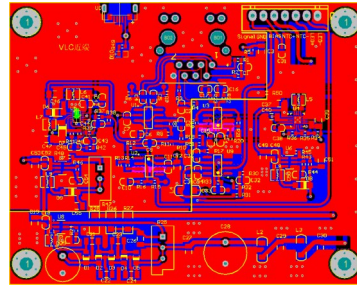
$$V_{OUT+} = V_{IN} \times \left(\frac{R_8}{2R_1} \right) \quad (8)$$

$$V_{OUT-} = -V_{IN} \times \left(\frac{R_5}{2R_4} \right) \quad (9)$$

3.4 整体电路集成

由于本系统包含电路模块较多,各个模块之间需要用传输线连接,这对整体系统的频率响应和稳定性都会造成一定的影响.因此,将整体电路进行集成化处理,将以上所述模块整合到一块 PCB 板上,不仅减小了占用面积,也增强了系统稳定性,可以真正应用到实际生活中.图 9 是集成后的 PCB 版图以及实物图.

为了考虑方便家庭安装使用,本研究将集成后的电路板封装在结构模块中,成品如图 10 所示.整体模



(a) 模块集成后的 PCB 版图



(b) 模块集成后的 PCB 实物图

图9 集成后的 PCB 版图以及实物图

块通过 RJ45 接口网线与终端进行数据交互,并使用 USB 接口供电.同时,本研究将激光器、APD 和透镜在电路中分离出来并单独封装,以方便调节与对准.

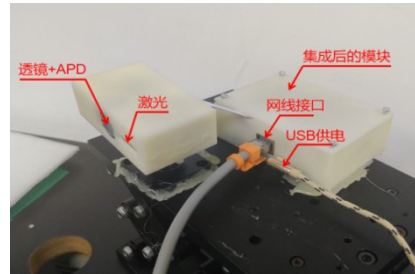


图10 系统集成封装后的成品图

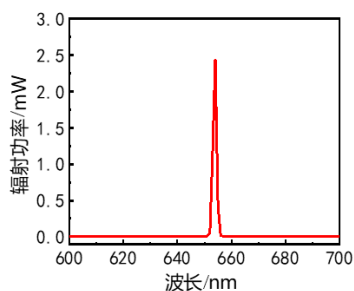
4 实验结果与性能分析

4.1 系统性能分析

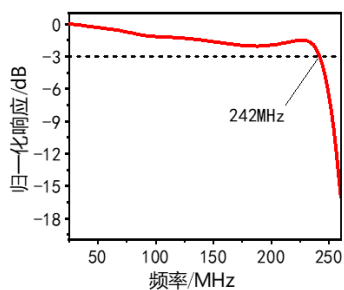
本系统所用的发射光源为红色激光器,工作过程中激光器的驱动电压设置为 4.5 V. 分别使用光谱分析仪 (Spectrometer, SPECTRO 320) 和矢量网络分析仪 (VNA, Keysight E5071C) 测量激光器在工作电压下的光谱和带宽,结果如图 11 所示,峰值波长约为 655 nm,带宽约 242 MHz. 光电探测器则选用硅基 APD,型号为 LSIAPD-S200,响应波长为 400~1700 nm,带宽为 1.25 GHz.

为了测试系统整体通信性能,如图 12 搭建测试链路,分别测量系统的带宽和不同速率下的眼图与误码率.

在如图 12(a) 的带宽测试链路中,矢量网络分析仪的 1 端口在近端模块的输入端加载扫频信号,远端模块



(a) 系统所用激光器的光谱



(b) 系统所用激光器的频率响应

图 11 系统所用激光器的光谱与频率响应

在收到扫频信号后将结果输入矢量网络分析仪的 2 端口. 系统的频率响应测试结果如图 13 所示, 整体系统的 -3 dB 带宽可达到 42 MHz, 可以适用于高速通信场景.

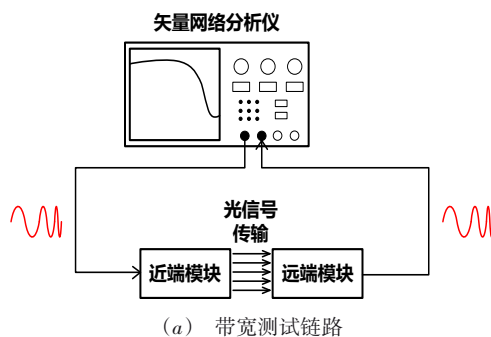
在如图 12(b) 的眼图测试链路中, 任意波形发生器 (AWG, Keysight M8190A) 在近端模块输入端产生不同速率的非归零开关键控 2^7-1 位伪随机位序列码 (PRBS-7), 使用高速示波器 (High-speed Oscilloscope, Keysight dssav134a) 分析输出波形的眼图, 结果如图 14 所示. 在速率为 100 Mbps 和 150 Mbps 时, 眼图清晰开放, 速率为 200 Mbps 时, 眼图变得不清晰.

在如图 12(c) 的误码率测试链路中, 在接收端使用误码率分析仪 (BERT, BitAlyzer BA) 测试不同比特速率下的误码率, 误码率阈值设为 3.8×10^{-3} , 测试结果如图 15 所示. 综合眼图与误码率的测试结果, 本系统能够实现速率为 150 Mbps 的高速信号传输.

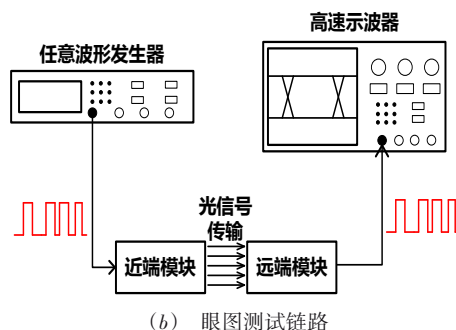
4.2 全双工以太网通信实验

基于可见光的全双工以太网通信实验平台如图 16 所示. 整体通信链路分为上行链路和下行链路, 近端与远端分别用两个相同的集成模块进行以太网信号传输, 在光路传输过程中加入了反射镜以增加通信距离. 系统远端的终端连接着家用设备以供上网, 如本次测试所用的家庭数字网络电视. 上、下行链路的传输原理相同, 通信距离达到 10 m.

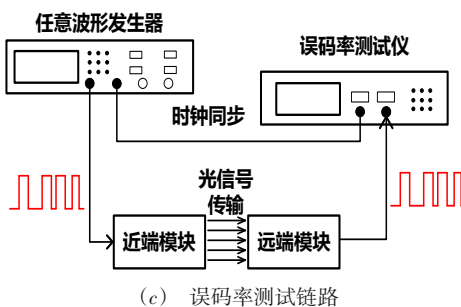
在使用本文系统之前, 先采用网线直连的方式使用数字网络电视连接实验场地的 100 Mbps 以太网网口, 并且隔十分钟测试一次设备的上传和下载速度. 然后



(a) 带宽测试链路



(b) 眼图测试链路



(c) 误码率测试链路

图 12 系统性能测试链路

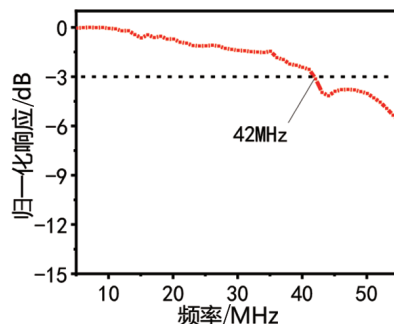


图 13 整体系统频率响应

再使用本文系统连接设备以供上网, 采用同样的方法测试网速, 使用网线直连方式以及本文系统连网方式上网时设备的上传、下载速度的测试结果对比如图 17 所示, 其中黑色虚线表示设备采用网线直连方式上网时的网速, 而红色实线表示设备使用本文系统上网的网速. 由结果可见, 使用该系统上网的设备上传速度与

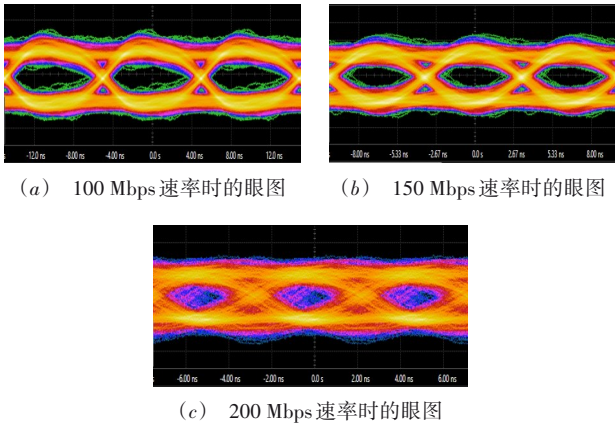


图 14 系统不同传输速率下的眼图情况

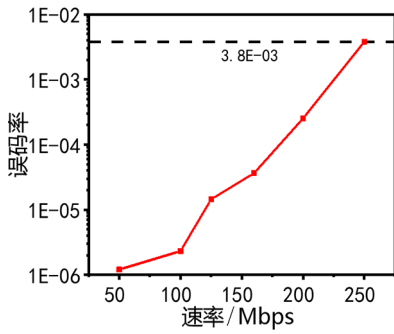


图 15 系统不同传输速率下的误码率情况

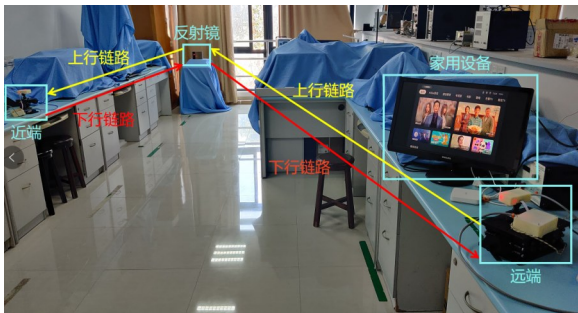
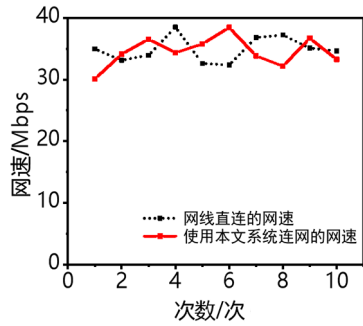


图 16 基于可见光的室内全双工以太网通信实验平台

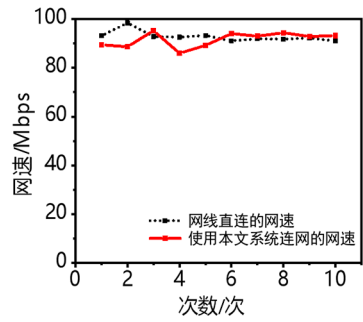
下载速度与采用网线直连方式时的速度基本一致,上传速度维持在 30~40 Mbps,下载速度维持在 90~100 Mbps,即表明本系统可以进行 100 Mbps 以太网的全双工传输.

在通信过程中,测试了以太网信号在输入系统前的波形以及信号经系统传输之后的波形,结果如图 18 所示. 100 Mbps 以太网信号采用 MLT-3 编码,信号分为“正电位”“负电位”“零电位”三种状态,从图中可见,经系统输出后的以太网信号幅度与输入前的幅度大致相同,虽然存在失真但依然可以清晰分辨电位状态,满足以太网通信要求.

本研究在测试过程中尝试移动接收端模块,发现在保证入射光依旧照射在透镜范围内情况下,接收端移动微小的距离以及转动较小的角度范围,整体系统

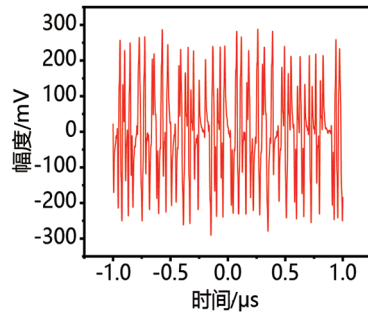


(a) 上传速度

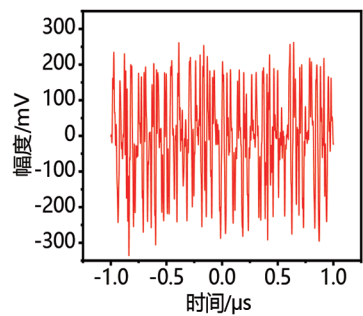


(b) 下载速度

图 17 采用网线直连方式以及本文系统连网方式上网时,设备的上传、下载网速测试结果对比



(a) 输入系统前的以太网信号



(b) 经系统传输后的信号

图 18 输入系统前后的以太网信号对比

依然可以稳定通信.

在上述测试的基础上,本研究还分别在黑暗环境、

正午窗外阳光加室内灯光环境、白光手电筒近距离照射下的极限环境下进行了系统通信测试。实验发现,无论是在黑暗环境,还是在有较强的环境光与人造光照下的环境,该系统都能够稳定传输 100 Mbps 的以太网信号,并且误码率无明显变化,因此该系统能够在多种光强环境下使用。

5 结论

本文设计了一种基于可见光通信技术的全双工以太网通信系统。该系统的近端和远端由以太网接口处理电路、差分转单端电路、单端转差分电路、光源驱动电路、光电检测电路等模块组成,并集成封装,在不经调制的情况下,上、下行链路都基于可见光通信技术对以太网信号进行传输。通过搭建实验平台,在实地测试的情况下实现了通信距离为 10 m 的 100 Mbps 以太网全双工通信,可以实现家庭数字网络电视、电脑等数字终端的高速远距离联网通信。同时为了进一步适应未来高速通信的需求,本课题组计划在该系统的基础上进行部分模块进行改进升级,例如替换主要限制系统带宽的跨阻放大、信号处理模块所用芯片,增加整体带宽,并重新设计更合适的外围电路,以减小信号失真、增加信噪比,争取实现 1 Gbps, 10 Gbps 以太网通信。

参考文献

- [1] 迟楠, 胡昉辰, 周盈君. 高速可见光通信技术的挑战与展望[J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(5): 56-61.
CHI N, HU F C, ZHOU Y J. The challenges and prospects of high-speed visible light communication technology[J]. ZTE Technology Journal, 2019, 25(5): 56-61. (in Chinese)
- [2] CHEN H S W, HUANG Y M, CHANG Y H, et al. High-bandwidth green semipolar (20-21) InGaN/GaN micro light-emitting diodes for visible light communication[J]. ACS Photonics, 2020, 7(8): 2228-2235.
- [3] CHEN H S W, SHEN C C, WU T, et al. Full-color monolithic hybrid quantum dot nanoring micro light-emitting diodes with improved efficiency using atomic layer deposition and nonradiative resonant energy transfer[J]. Photonics Research, 2019, 7(4): 416-422.
- [4] KANG C H, DURSUN I, LIU G, et al. High-speed colour-converting photodetector with all-inorganic CsPbBr₃ perovskite nanocrystals for ultraviolet light communication [J]. Light: Science & Applications, 2019, 8(1): 94.
- [5] CHEN Z L, LIU Z Q, WEI T B, et al. Improved epitaxy of AlN film for deep-ultraviolet light-emitting diodes enabled by graphene[J]. Advanced Materials, 2019, 31(23): 8.
- [6] KONTHOUJAM J, SINGH, HUANG Y M, et al. Micro-LED as a promising candidate for high-speed visible light communication[J]. Applied Sciences-Basel, 2020, 10(20): 7384.
- [7] LIU J, WANG J, SUN X, et al. InGaN-based quantum well superluminescent diode monolithically grown on Si[J]. ACS Photonics, 2019, 6(8): 2104-2109.
- [8] MINOTTO A, HAIGH P A, LUKASIEWICZ L G, et al. Visible light communication with efficient far-red/near-infrared polymer light-emitting diodes[J]. Light: Science & Applications, 2020, 9(1): 11.
- [9] TIAN P, CHEN H, WANG P, et al. Absorption and scattering effects of Maalox, chlorophyll, and sea salt on a micro-LED-based underwater wireless optical communication[J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(10): 61-68.
- [10] 母一宁, 杜月, 李野, 等. 空间光通信用复合波导阳极微通道光电倍增管[J]. 电子学报, 2016, 44(11): 2812-2816.
MU Y N, DU Y, LI Y, et al. Complex waveguide anode micro-channel plate-photomultiplier tube(MCP-PMT) for space optical communication[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(11): 2812-2816. (in Chinese)
- [11] 迟楠, 石蒙, 哈依那尔, 等. LiFi:可见光通信技术发展现状与展望[J]. 照明工程学报, 2019, 30(1): 1-9.
CHI N, SHI M, HAYI N E, et al. LiFi: Development status and prospects of visible light communication technology[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2019, 30(1): 1-9. (in Chinese)
- [12] KOMINE T, HARUYAMA S, NAKAGAWA M. A study of shadowing on indoor visible-light wireless communication utilizing plural white LED lightings[J]. Wireless Personal Communications, 2005, 34(1-2): 211-225.
- [13] KIRAVUO T, SARELA M, MANNER J. A survey of ethernet LAN security[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2013, 15(3): 1477-1491.
- [14] 雷维嘉, 周洋. MIMO全双工双向通信系统平均保密和速率的优化[J]. 电子学报, 2020, 48(6): 1041-1051.
LEI W J, ZHOU Y. The optimization of average secrecy sum rate for MIMO full duplex two-way communication systems[J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48(6): 1041-1051. (in Chinese)
- [15] 杨玉峰, 蒋明争, 张颖, 等. 基于单光源的全双工可见光通信系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(1): 78-86.
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): 78-86. (in Chinese)

- [16] CI H N, CHANG H L, WANG R Y, et al. Enhancement of heat dissipation in ultraviolet light-emitting diodes by a vertically oriented graphene nanowall buffer layer[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(29): 8.
- [17] LIU X, LIN R, CHEN H, et al. High-bandwidth InGaN self-powered detector arrays toward MIMO visible light communication based on micro-LED arrays[J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(12): 3186-3195.
- [18] BONI A, PIERAZZI A, VECCHI D. LVDS I/O interface for Gb/s-per-pin operation in 0.35- μm CMOS[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2001, 36(4): 706-711.
- [19] LIN W Y, CHEN C Y, LU H H, et al. 10m/500Mbps WDM visible light communication systems[J]. *Optics Express*, 2012, 20(9): 9919-9924.
- [20] HUANG X, WANG Z, SHI J, et al. 1.6 Gbit/s phosphorescent white LED based VLC transmission using a cascaded pre-equalization circuit and a differential outputs PIN receiver[J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 22034-22042.

作者简介



卢霆威 男,1997年11月出生,福建三明人。现为厦门大学电子科学与技术学院在读硕士生。主要研究方向为可见光通信技术。
E-mail: 33320191150296@stu.xmu.edu.cn



吴挺竹(通信作者) 男,1985年12月出生,福建宁德人。现为厦门大学电子科学与技术学院副教授,研究生导师。主要研究方向为可见光通信技术、Micro-LED全彩化显示等。
E-mail: wutingzhu@xmu.edu.cn