



专题: 可见光通信

基于可见光通信的零能耗光标签

马天洋^{1,2}, 陈雄斌^{1,3}, 徐义武^{1,2}

- (1. 中国科学院半导体研究所光电子材料与器件重点实验室, 北京 100083;
2. 中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049;
3. 中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 101408)

摘要: 为了实现可见光标签的零能耗, 利用 MATLAB、MULTISIM 对接收机的阻抗匹配进行了仿真, 使一阶均衡电路的输入阻抗与太阳能电池面板内阻相匹配, 在拓展系统带宽的同时保证太阳能电池面板输出功率达到最高。仿真结果表明, 均衡电路输入阻抗与太阳能电池面板内阻匹配时, 相比常见的 $50\ \Omega$ 不匹配状态, 输出功率提高了 86.2%。搭建了可见光零能耗光标签原型系统, 使用 15 W 的发光二极管 (light emitting diode, LED) 灯以 115 200 Baud 发送字符, 1.3 m 远处的碲化镉太阳能电池面板收集能量并接收信号, 低功耗单片机通过模数转换 (analog-to-digital converter, ADC) 计算进行数据恢复后, 使用有机发光二极管 (organic light-emitting diode, OLED) 屏幕显示接收到的标签字符。接收机的信号接收、处理计算与屏幕显示的能量均由太阳能电池面板提供, 不需要电池或外接电源供电, 实现了零能耗的可见光标签显示业务。

关键词: 物联网; 零能耗; 可见光通信

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023102

Zero power light labeling based on visible light communication

MA Tianyang^{1,2}, CHEN Xiongbin^{1,3}, XU Yiwu^{1,2}

1. Key Laboratory of Opto-Electronic Materials and Devices, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China
2. College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China

Abstract: In order to achieve zero energy consumption of visible light labels, MATLAB and MULTISIM were used to simulate the impedance matching of the receiver, matching the input impedance of the first-order equalization circuit with the internal resistance of solar panel, while expanding the system bandwidth and ensuring the highest output power of the solar panel. The simulation results show that the output power of the solar panel is increased by 86.2% when the input impedance of the equalization circuit matches solar panel, compared to the common $50\ \Omega$. The proto-

收稿日期: 2023-04-18; 修回日期: 2023-05-07

通信作者: 陈雄斌, chenxiongbin@semi.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61875183)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61875183)

type system of zero-energy optical label of visible light was built. A 15 W LED lamp was used to send characters at 115 200 Baud, and a cadmium telluride solar panel was used to collect energy and receive signals at a distance of 1.3 m. Low-power microcontroller was used to recover data through ADC and computation, and OLED screens were used to display the received label characters. The signal reception, processing computing, and screen display energy of the receiver were all provided by solar panel, without the need for batteries or external power supply. The visible light label display service with zero energy consumption has been implemented.

Key words: IoT, zero power, visible light communication

0 引言

物联网 (Internet of things, IoT) 通过部署具有通信、感知、计算等功能的嵌入式芯片, 使物理实体连接网络, 并利用网络完成信息的传输和处理, 实现物与物、物与人之间的信息互联^[1]。物联网的核心关键技术主要包括无线射频识别 (radio frequency identification, RFID)、传感、无线网络、人工智能、云计算、无线供能等^[2]。应用物联网核心技术, 不仅可以促进国民经济的可持续发展, 还可以促进物联网向智能化、无人化方向发展^[3], 例如, 在停车场应用物联网技术实现空闲停车位查找、自动停车、最优路线显示等功能; 在物流领域可以实现物品无接触识别、跟踪、追溯等功能。姚建铨院士认为, 作为信息通信技术的突破方向, 物联网蕴含巨大的增长潜能, 是重要的战略性新兴产业^[4]。随着物联网应用的蓬勃发展, 物联网设备有限的电池容量与人们日益增长的数据传输量需求之间的矛盾日益严峻^[5]。因此, 在提高通信传输速率的同时, 需要不断减小终端能耗, 无线供能通信技术的出现在一定程度上缓解了物联网终端过于依赖电池的问题^[6-7]。随着国家大力推行节能减排政策, 利用现有的照明光源进行零能耗通信具有重要意义。2022年1月, OPPO研究院发布了首个《零功耗通信》白皮书, 白皮书中提到“零功耗通信将致力于满足现有的物联网通信技术仍无法满足的通信场景, 实现与现有物联网通信技术的良好互补, 从而满足多层次多维度的物联网通信需求”^[8-9]。同时, 白皮书中还提及了现

有射频无线供能技术存在的问题, 电磁波的多径传播效应、能量在空间和时间上不均匀分布以及各种干扰导致无线环境中能够采集到的射频能量密度极低 (小于 10 nW/cm^2), 从而导致能量转化效率较低^[8]。

可见光信号频段不属于射频, 既不会产生射频干扰, 也不会被其他射频信号干扰。相较无线环境中低能量密度的射频信号, 可见光通信使用大功率 LED 作为信号源能量大, 因此, 利用高效率的太阳能电池, 可以实现较高的输出功率, 为通信电路供电。2013年, Kim 等^[10]验证了太阳能电池可以在太阳光照的情况下探测到光通信信号, 证明了太阳能电池作为光通信系统探测器的可行性。2015年, Malik 等^[11]使用太阳能电池实现了 8 kbit/s 的零能耗可见光通信。2016年, Carrascal 等^[12]搭建了一个按需唤醒接收端的零能耗通信系统, 但未说明太阳能电池的最大输出功率。2020年, Sun 等^[13]使用硅光电池搭建了一个自供能通信系统, 使用太阳能电池为单片机供电恢复太阳能电池接收到的数据, 通过串口助手输出, 未达到接收数据在显示屏上的零能耗显示。从已有的研究成果可以看出, 为了保证通信速率, 自供能可见光通信系统的探测器面积受到限制, 太阳能电池功率较小, 不能驱动大的负载电路, 限制了系统实际业务功能的实现。

为了提高以太太阳能电池为探测器的可见光通信系统的性能, 可以通过均衡技术拓展系统带宽, 通过设计阻抗匹配电路, 使太阳能电池输出功率达到最大。本文提出在接收机中利用后端均衡电



路提高可见光通信系统的通信速率,同时让均衡电路的输入阻抗匹配太阳能电池的内阻,使太阳能电池的输出功率达到最大。该系统利用低功耗单片机进行 A/D 转换、字符显示驱动等功能,实现了光标签的零能耗接收及字符显示。本文展示了照明、通信、供能复用的可见光通信,据我们所知,也是国内外首次实现零能耗的可见光标签显示业务。

零能耗可见光标签系统包含发射端与接收端,发射端完成光数据及光能量的发射,接收端实现光数据的接收及光能量采集。为了优化设计零能耗通信,需要对接收端太阳能电池的供能与通信进行建模,研究太阳能电池输出功率的变化规律,优化基于太阳能电池的接收电路设计,使得太阳能电池输出功率最大,同时利用均衡电路提高通信信号的质量。

1 零能耗光标签系统结构

1.1 零能耗光标签模型的建立

可见光零能耗光标签系统框架如图 1 所示,包括驱动电路、发光二极管(light emitting diode, LED)光源、太阳能电池、低功耗单片机与有机发光二极管(organic light-emitting diode, OLED)屏幕。LED 光源给接收端提供能量与数据,接收端利用太阳能电池既接收能量又采集数据,最终实现零能耗的光标签字符显示。

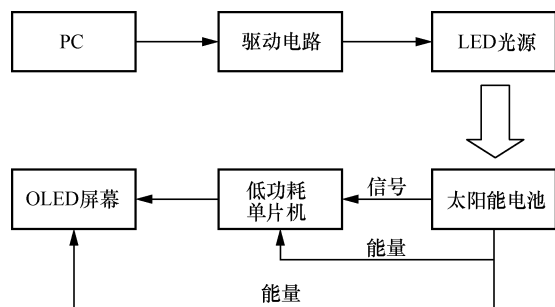


图 1 可见光零能耗光标签系统框架

1.2 均衡电路阻抗匹配模型

太阳能面板作为电池与作为光探测器,实现

的功能存在差异。本文参考文献[14-15]等的研究成果,根据太阳能电池在零能耗光标签中的作用,以郭俊清等^[14]提出的模型为基础,设定光电池的等效电路,太阳能电池等效电路模型如图 2 所示,其中 I_{PH} 为光生电流, I_d 为二极管电流, C_j 为太阳能电池的结电容, R_{th} 为等效漏电阻, I_{th} 为漏电流, R_s 为引导电极管芯接触电阻, R 为太阳能电池外部负载电阻。

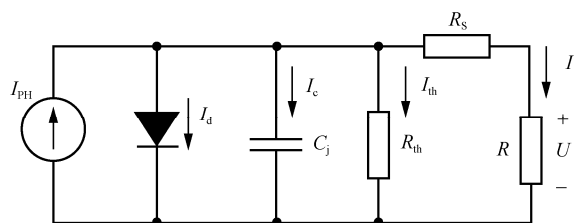


图 2 太阳能电池等效电路模型

设硅光电池阵列输出电流为 I , 输出电压为 U , 则电流 I 可表示为:

$$I = I_{PH} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{(U + IR_s)}{NAKT} \right] - 1 \right\} - C \frac{d(U + IR_s)}{dt} - \frac{U + IR_s}{R_{SH}} \quad (1)$$

其中, I_{PH} 是太阳能电池在特定光照下产生的光生电流, 它的数值由接收端接收到的光功率大小决定, 在恒定光照下, 其光生电流的大小不随工作状态而变化, 可以看作一个恒流源; I_d 是太阳能电池中表征空间电荷区复合损耗的二极管电流, 与温度 T 、二极管理想因子 A 以及串联的电池板数目 N 有关, K 是玻尔兹曼常数, I_0 是饱和暗电流, 通常情况下与指数项相比可以忽略; I 为输出电流, 与负载电路的电阻 R 有关; U 为输出电压; R_{SH} 是太阳能电池的漏电流的分流电阻; R_s 是电池不同单元之间连接线上引起电压损失的串联等效电阻, 且通常情况下, R_{SH} 远大于 R_s ; R_L 是太阳能电池外接的负载电阻, 负载电阻的取值对太阳能电池的输出功率影响很大。通过测试太阳能电池的伏安特性曲线可以求出 R_s 和 R_{SH} , 并认为

在一定光照范围内保持不变。

太阳能电池内阻与可见光通信接收机电路输入阻抗的匹配问题值得研究。当可见光通信电路的输入阻抗与太阳能电池的内阻匹配时,太阳能电池的输出功率最大。因此在太阳能电池与通信电路之间需要设计一个阻抗匹配电路,才能使太阳能电池输出功率最大。

为了测量太阳能电池在光标签系统中实际的伏安特性,令光照条件不变,接收端光照度为 3 500 lx,改变太阳能电池的负载,测量太阳能电池对应的输出电压,可以得到一条 R-V 曲线,将测量数据导入 MATLAB,计算得到负载上的电流,从而得到 I-V 曲线与 P-V 曲线,太阳能电池静态输出特性曲线如图 3 所示。

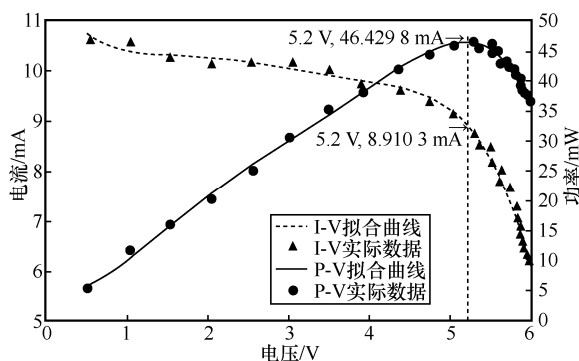
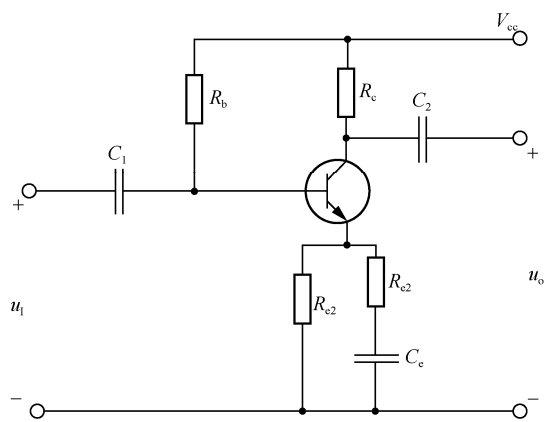


图3 太阳能电池静态输出特性曲线

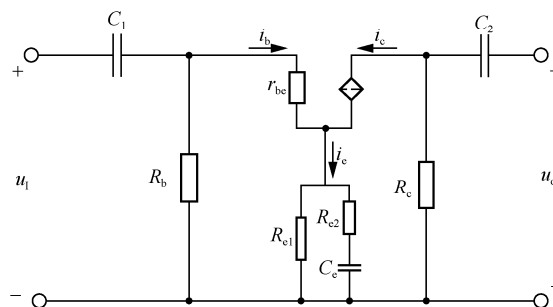
利用 MATLAB 计算出功率最大值约为 46.43 mW,此时,太阳能电池输出电压为 5.2 V,流过负载的电流约为 8.9 mA,负载约为 584 Ω 。

根据测量的数据,确定太阳能电池模型的关键参数。为了实现太阳能电池输出功率最大,需要将通信电路的输入阻抗设置为 584 Ω 。因此,必须为均衡电路增加阻抗匹配功能。为了简化接收电路,可以采用一阶均衡电路,均衡电路示意图如图 4 所示,其中 R_b 为直流偏置电阻; C_1 、 C_2 是隔直电容,用于隔离前后两级电路中的直流成分,降低电路设计的复杂度; V_{cc} 为直流电源,为放大输入信号提供能量,由太

阳能电池提供; R_{e2} 、 R_{e1} 与 C_e 用来实现信号的频域均衡。



(a) 均衡电路



(b) 均衡电路的等效电路

图4 均衡电路示意图

均衡电路输入阻抗 R_i 表示为:

$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = R_b // \left\{ r_{be} + (1 + \beta) \left[R_{e1} // \left(R_{e2} + \frac{1}{j\omega C_2} \right) \right] \right\} \quad (2)$$

其中, U_i 为输入电压, U_o 为输出电压, β 为三极管电流放大倍数, r_{be} 为晶体管的输入电阻, 一般 $(1 + \beta)[R_{e1} // (R_{e2} + \frac{1}{j\omega C_2})] \gg r_{be}$, 因此在计算 R_i 时, 可以忽略 r_{be} 。

本文使用后端均衡电路提高系统通信带宽并实现阻抗匹配。为了让均衡电路的输入阻抗与太阳能电池的内阻匹配,保证太阳能电池的输出功率最大,令 R_i 的值与实验所得的太阳能电池输出最大功率的负载值相等,即 $R_i=584 \Omega$ 。为了进一



步确定均衡电路的各元件参数,可利用均衡电路的幅频响应约束元件参数。均衡电路需要具备特定的幅频响应,从均衡原理可知,电路的幅频响应由传递函数得出,传递函数的零极点对应一条传递函数曲线。所以,利用 MATLAB 软件设计合适的零极点能得到传递函数曲线,而这些选定的零极点就可以用来确定均衡电路的元件参数。

设均衡电路的传递函数为 $H_{eq}(s)$, 如式 (3) 所示, 根据电路结构可确定均衡电路的传递函数与零极点的表达式, 如式 (4) 所示。

$$H_{eq}(s) = \frac{R_c // R_L}{R_{e1} // (R_{e2} + X_c)} = \frac{1}{K \times \frac{z + \frac{1}{(R_{e1} + R_{e2})C_e}}{P + \frac{1}{R_{e2}C_e}}} \quad (3)$$

$$X_{ce} = \frac{1}{sC_e}, \quad z = -\frac{1}{(R_{e1} + R_{e2})C_e}, \quad P = -\frac{1}{R_{e2}C_e} \quad (4)$$

其中, K 为常数项, 反映了系统幅频响应曲线在垂直方向的位置, 不改变曲线形状。

$$K = \frac{R_c R_L}{(R_c + R_L)} \times \frac{(R_{e1} + R_{e2})}{R_{e1} R_{e2}} \quad (5)$$

其中, R_L 是后一级电路的输入电阻, 是一个确定值, 在与通信电路阻抗匹配的情况下可以记为 50Ω 。当 R_{e1} 、 R_{e2} 和 C_e 取合适的值时, 电路的传递函数与软件仿真得出的传递函数具有相同曲线, 当 $s=j\omega$ 时, 得到电路的幅频响应 $H_{eq}(j\omega)$, 由于电路的零极点是从小理想传递函数得出的, 因此具有最接近理想的幅频响应。

通过实验测量不同频率信号激励下的输出信号幅度, 可绘制出太阳能电池的幅频曲线, 一阶均衡电路的幅频响应曲线如图 5 所示。实验结果显示, 频率越高, 信号衰减越大。因此, 均衡电路理想的幅频响应需要与太阳能电池的幅频响应互补, 在频率越高时, 对信号的增益越大。根据均衡电路的理想频率响应数据可以拟合出零极

点, 再根据零极点获得均衡电路的传递函数。按照上述设计思路, 绘制出如图 5 所示曲线, 与理想的频率响应曲线的差值接近 0 dB 。最后将计算出的理想均衡电路的传递函数与图 4 所示的一阶均衡电路的传递函数匹配, 根据式 (3)、式 (4) 与式 (5) 可确定图 4 均衡电路中的元件参数。

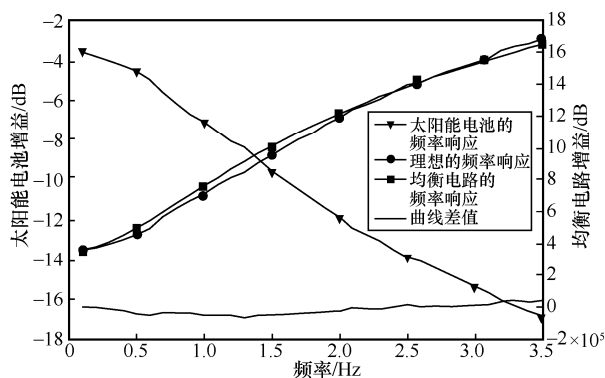


图 5 一阶均衡电路的幅频响应曲线

本文根据式 (2)、式 (3)、式 (4) 与式 (5) 约束元件参数, 将实验测量的太阳能电池数据代入表达式计算, 由于未知数较多, 先确定三极管的型号, 再求解元件参数。均衡电路使用的晶体管型号为 NPN 型三极管 SS8050, 具有低电压和高电流能力。由式 (3) 可知, R_b 的大小不影响均衡电路的传递函数, 因此将式 (3)、式 (4) 与式 (5) 中的参数优先确定, 再根据式 (2) 确定 R_b 的值计算得到均衡电路器件参数, 具体参数值为 $R_b=880 \Omega$ 、 $R_{e1}=192 \Omega$ 、 $R_{e2}=8.3 \Omega$ 、 $R_c=10 \text{ k}\Omega$ 、 $C_e=10 \text{ nF}$ 。

1.3 电路仿真

利用计算出的元件参数搭建 MULTISIM 仿真电路, 如图 6 所示。

为了得到 MULTISIM 仿真电路的最大输出功率, 利用 MATLAB 计算均衡电路取不同输入阻抗时对应的一组元件参数值。在不改变均衡电路幅频响应曲线对应的零极点的情况下, 当均衡电路的元件参数改变时, 其输入阻抗也随之改变, 通过 MULTISIM 仿真计算太阳能电池的输出功率。

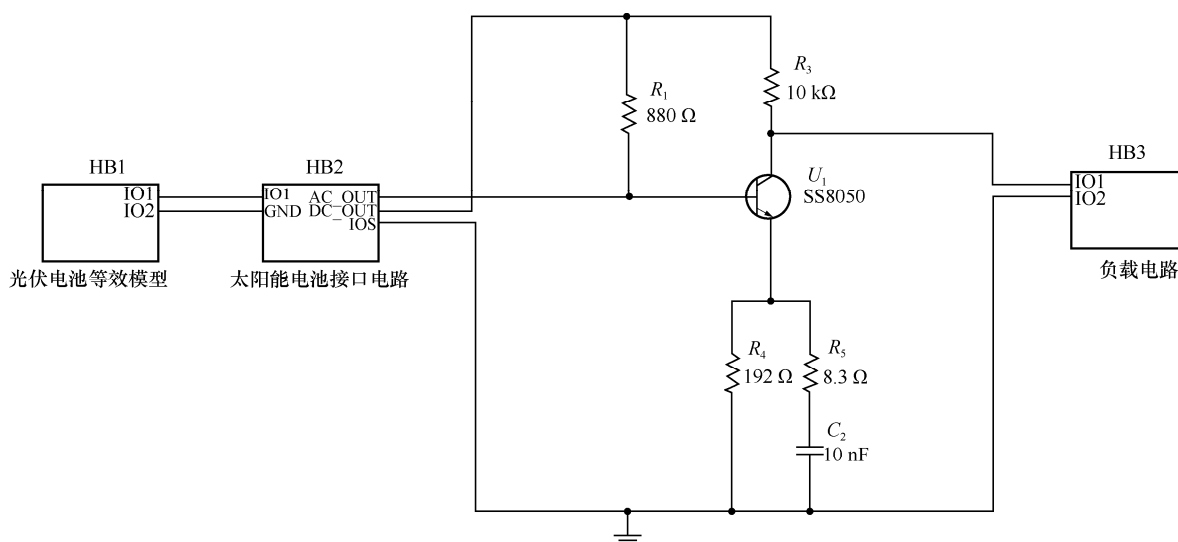


图6 MULTISIM 仿真电路

在不同输入阻抗下, MULTISIM 仿真电路太阳能电池的输出功率曲线如图 7 所示。

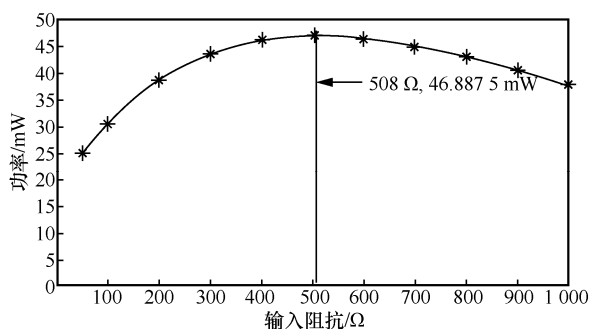


图7 MULTISIM 仿真电路太阳能电池的输出功率曲线

由电路仿真可知, 当输入阻抗为 508Ω 时, 太阳能电池输出功率最大, 输出功率约为 46.89 mW 。仿真的结果与实际实验测量后拟合出的最大输出功率 46.43 mW (负载 584Ω) 有一定误差。误差出现的原因在于 MULTISIM 建立的太阳能电池模型与实际的碲化镉太阳能电池存在差异, 在计算均衡电路输入阻抗时, 忽略了晶体管的输入电阻 r_{be} 。

根据仿真计算可知, 增加阻抗匹配功能后, 太阳能电池的输出功率大幅增加。和均衡电路取 50Ω 输入阻抗的不匹配 (低阻) 状态相比, 输出功率提高了 86.2% ; 和均衡电路取 $1 \text{ k}\Omega$ 输

入阻抗的不匹配 (高阻) 状态相比, 输出功率提高了 24.5% 。

2 实验与结果

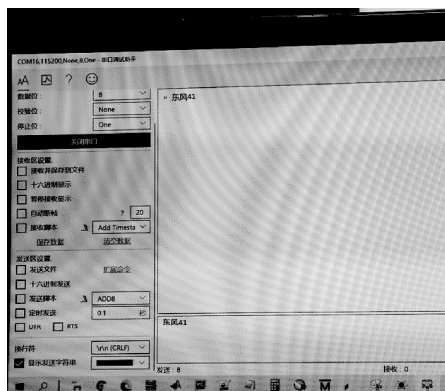
为了验证灯光照射条件下通信、计算、显示零能耗一体化的可行性, 搭建了基于碲化镉太阳能电池的自供能字符显示原型系统。为了进一步降低接收机能耗, 接收端省掉了后端均衡电路, 用电阻并联实现太阳能电池的输出阻抗匹配, 并在发射端增加合适的预均衡电路实现和后端均衡电路类似的带宽拓展功能。均衡电路被移植到发射端, 既可以提高系统带宽, 又减小了接收端的自供能压力^[16]。

系统实验验证在夜间进行, 实验中使用商用大功率荧光型白光 LED 灯作为光源, 电功率为 15 W , 工作电流为 300 mA , 显色指数为 90 , 测试距离为 1.3 m , 利用串口助手发送字符消息, 利用碲化镉太阳能电池 ($164 \text{ mm} \times 133 \text{ mm} \times 3.2 \text{ mm}$) 作为探测器, 光照度计 (TES-1339) 测得接收端平均光照度为 3500 lx , 通过 ATSM21 开发板接收信号, 通过内部模数转换 (analog-to-digital converter, ADC) 电路恢复信号, 并使用 OLED 显示接收信息, 实验系统实物如图 8 所示。

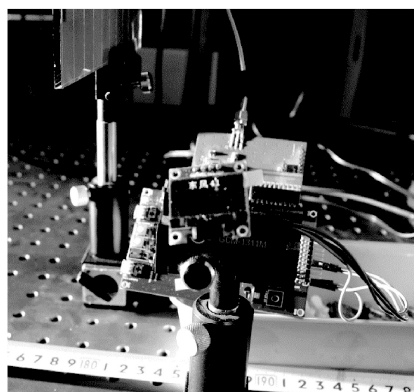


图8 实验系统实物

发射端利用串口发送信号,通信软件使用串口调试助手,串口波特率设置为 115 200 Baud,无校验位,数据位 8 位,停止位 1 位。串口调试助手发送的数据通过计算机的虚拟串口以晶体管—晶体管逻辑(transistor-transistor logic, TTL)电平的形式发送,串口助手发送的 TTL 信号经过发射端的前均衡电路后被送到荧光型 LED 灯。LED 灯利用调制电路将信号调制到 LED 灯光上。接收端使用太阳能电池接收能量与信息。通过接口电路,将直流分量与交流分量分离。直流分量用于供电,交流分量用于通信。直流分量通过电源管理芯片,稳定输出 3.3 V 电压。交流信号通过 SAML21 开发板的 ADC 接口输入单片机,利用自主开发的信号恢复算法,将采集的 A/D 转换数据恢复成通信数据,并利用 OLED 屏幕显示字符内容。在接收端,没有外接任何供电设备,接收端的通信、计算、显示功能实现需要的所有能量均来自于太阳能电池供电。零能耗字符显示系统发送界面与显示界面如图 9 所示。



(a) 串口助手发送界面



(b) OLED显示

图9 零能耗字符显示系统发送界面与显示界面

3 结束语

本文将无线供能技术与可见光通信(visible light communication, VLC)技术融合,研究了 VLC 系统在光信号通信的同时进行光无线供能的可行性。均衡电路的输入阻抗为 584Ω 左右时能与太阳能电池内阻阻抗匹配,太阳能电池的输出功率达到最大,与仿真验证得到的输入阻抗值基本相等。增加阻抗匹配电路后,太阳能电池的输出功率相比均衡电路输入阻抗 50Ω 的未匹配状态,输出功率提升了 86.2%,验证了阻抗匹配的有效性。

使用大功率 LED 照明光源作为发送端,太阳能电池作为探测器的零能耗字符显示系统实现了照明、通信、供能一体,首次实现了零能耗的可见光标签显示业务,为可见光通、感、能、算一体化提供了新的思路,为射频敏感区的物联网零能耗标签显示提供了解决方案。

参考文献:

- [1] ZHOU H Y, ZHANG M L, REN X M. Design and implementation of wireless optical access system for VLC-IoT networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(8): 2369-2380.
- [2] 张凌峰, 孟忻, 芮鹤龄, 等. 物联网关键技术及应用研究[C]//中国通信学会学术年会. 中国通信学会第六届学术年会论文集. 北京: 国防工业出版社, 2009: 5.

ZHANG L F, MENG X, RUI H L, et al. Research on key tech-

- nologies and applications of Internet of things[C]//Annual Conference of China Communications Society. Proceedings of the 6th Academic Annual Conference of China Communications Society. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 5.
- [3] 李凯. 无线传感技术在物联网中的应用研究[J]. 光源与照明, 2022(12): 82-84.
- LI K. Research on the application of wireless sensor technology in the Internet of things[J]. Lamps and Lighting, 2022(12): 82-84.
- [4] 姚建铨. 我国发展物联网的重要战略意义[J]. 人民论坛·学术前沿, 2016(17): 4-13.
- YAO J Q. The strategic significance of the development of the Internet of things in China[J]. Frontiers, 2016(17): 4-13.
- [5] 徐勇军, 谷博文, 陈前斌, 等. 基于能效最大的无线供电反向散射网络资源分配算法[J]. 通信学报, 2020, 41(10): 202-210.
- XU Y J, GU B W, CHEN Q B, et al. Energy efficiency maximization resource allocation algorithm in wireless-powered backscatter communication network[J]. Journal on Communications, 2020, 41(10): 202-210.
- [6] 张晨. 物联网中的 RFID 技术及物联网的构建探究[J]. 新型工业化, 2022, 12(1): 51-53.
- ZHANG C. Research on RFID technology in Internet of things and the construction of Internet of things[J]. The Journal of New Industrialization, 2022, 12(1): 51-53.
- [7] WU F H, YANG D C, XIAO L, et al. Energy consumption and completion time tradeoff in rotary-wing UAV enabled WPCN[J]. IEEE Access, 2019(7): 79617-79635.
- [8] OPPO 研究院. 零功耗通信白皮书[R]. 2022.
- OPPO Research Institute. White paper on zero-energy communication[R]. 2022.
- [9] 张晓茜, 徐勇军. 面向零功耗物联网的反向散射通信综述[J]. 通信学报, 2022, 43(11): 199-212.
- ZHANG X X, XU Y J. Survey on backscatter communication for zero-power IoT[J]. Journal on Communications, 2022, 43(11): 199-212.
- [10] KIM S M, WON J S. Simultaneous reception of visible light communication and optical energy using a solar cell receiver[C]//Proceedings of 2013 International Conference on ICT Convergence (ICTC). Piscataway: IEEE Press, 2013: 896-897.
- [11] MALIK B, ZHANG X. Solar panel receiver system implementation for visible light communication[C]//Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems (ICECS). Piscataway: IEEE Press, 2016: 502-503.
- [12] CARRASCAL C, DEMIRKOL I, PARADELLS J. On-demand sensor node wake-up using solar panels and visible light communication[J]. Sensors, 2016, 16(3): 418.
- [13] SUN Q G, CHEN X B, MIN C Y, et al. Self-powered signal processing system for visible light communication based on solar panels[J]. Optical Engineering, 2020, 59(10): 105107.
- [14] 郭俊清, 陈雄斌, 李洪磊, 等. 基于光电探测器可见光通信系统无线供能技术研究[J]. 半导体光电, 2015, 36(5): 773-776, 848.
- GUO J Q, CHEN X B, LI H L, et al. Analysis of wireless energy harvesting technology in visible light communication system based on photocell detector[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2015, 36(5): 773-776, 848.
- [15] WANG Z X, TSONEV D, VIDEV S, et al. On the design of a solar-panel receiver for optical wireless communications with simultaneous energy harvesting[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(8): 1612-1623.
- [16] XU Y W, CHEN X B, WANG Y F. Bandwidth expansion of zero-power-consumption visible light communication system[J]. Photonics, 2023, 10(4): 376.

[作者简介]



马天洋 (1999-), 男, 中国科学院半导体研究所光电子材料与器件重点实验室硕士生, 主要研究方向为可见光通信。



陈雄斌 (1973-), 男, 博士, 中国科学院半导体研究所光电子材料与器件重点实验室研究员, 中国科学院大学教授、博士生导师, 主要研究方向为光互连和可见光通信。



徐义武 (1996-), 男, 中国科学院半导体研究所光电子材料与器件重点实验室硕士生, 主要研究方向为可见光通信。