

doi:10.13756/j.gtxyj.2025.240022.

光通信系统与网络技术

涂俊轩,樊庭冰,倪慧琳,等.面向光信息与能量同步传输的接收电路研究[J].光通信研究,2025(2):240022.

Tu J X, Fan T B, Ni H L, et al. Study on a Receiver Circuit for Simultaneous Lightwave Information and Power Transfer[J]. Study on Optical Communications, 2025(2): 240022.

面向光信息与能量同步传输的接收电路研究

涂俊轩,樊庭冰,倪慧琳,庄济舟,曹国洋,吴绍龙,李孝峰

(苏州大学 a. 光电科学与工程学院; b. 苏州纳米科技协同创新中心; c. 教育部现代光学技术重点实验室;
d. 江苏省先进光学制造技术重点实验室,江苏 苏州 215006)

摘要:【目的】在光信息与能量同步传输(SLIPT)系统中,能量采集(EH)与信息传输(IT)两种功能相互制约,为了使SLIPT系统更高效地工作,需要对两者进行调控。【方法】文章首先测试了目前SLIPT系统中常用的接收电路,并依据测试结果对接收电路进行了优化。文章所设计的接收电路由解耦合电路、EH电路和信号处理电路3个电路组成,其中,解耦合电路由能量采集支路(EHB)、电流调控支路(CRB)和信息传输支路(ITB)3条支路组成,用于分离和调控光/电转换器件输出电流;EH电路由升压、能量管理和稳压电路组成,用于能量的采集管理和输出;信号处理电路由两级低通同相放大和阈值比较电路组成,用于信号的滤波放大和整形。然后,将接收电路应用于以发光二极管(LED)和光伏电池(PV)为光/电转换器件及以单片机为处理器的SLIPT系统中,文章归纳了EH和IT两个功能之间的制约关系和调控方式。【结果】测试结果表明,基于文章设计的电路,SLIPT系统能在EH、IT和信息与能量同时传输模式之间切换,通过调节接收电路的参数能够调控PV输出电流分配,从而调控输入到EHB的功率和ITB的信干比(SIR),进而实现能量的高效采集和信息的稳定传输,对应的能量存储功率和通信速率可由解耦合电路均衡与调控。【结论】接收电路能在无外加电源的情况下工作,同时具备最大功率点追踪、低功耗和工作模式可调等特点。

关键词:光信息与能量同步传输;光伏电池;能量采集;信息传输;电路设计

中图分类号:O436 **文献标志码:**A

Study on a Receiver Circuit for Simultaneous Lightwave Information and Power Transfer

TU Junxuan, FAN Tingbing, NI Huilin, ZHUANG Jizhou, CAO Guoyang, WU Shaolong, LI Xiaofeng

(a. School of Optoelectronic Science and Engineering; b. Collaborative Innovation Center of Suzhou Nano Science and Technology; c. Key Lab of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China; d. Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: 【Objective】The two functions of Energy Harvesting (EH) and Information Transmission (IT) are mutually restricted in the Simultaneous Lightwave Information and Power Transfer (SLIPT) system. In order to make the SLIPT system work more efficiently, it is necessary to regulate these two functions. 【Methods】The article firstly tests the commonly used receiver circuit in SLIPT system to optimize the receiver. The receiver circuit designed in this article consists of three circuits: decoupling, energy harvesting and signal processing. The decoupling circuit consists of three branches, including Energy Harvesting Branch (EHB), Current Regulation Branch (CRB) and Information Transmission Branch (ITB), which is used to separate and regulate the output current of the optoelectronic converter. The EH circuit consists of three parts: boost circuit, energy management circuit and voltage stabilizing circuit, which is used for EH management and output. The signal processing circuit consists of a two-stage low-pass filtered non-inverting amplifier circuit and a threshold comparison circuit, which is used for signal filtering, amplifying and shaping. Finally, the receiving circuit is applied in a SLIPT system that uses Light-Emitting Diodes (LEDs) and Photovoltaic cells (PV) as optical/electrical conversion devices, and a microcontroller as the processor. The constraints and control methods between the two functions of EH and IT are summarized. 【Results】Experiment results show that the SLIPT system based on the as-designed circuit can be controlled to work in the EH mode, IT mode, or information-energy simultaneous transmission mode. By adjusting the parameters of the receiving circuit, the PV output current distribution can be regulated, thereby controlling the power input to the EHB and the Signal-to-Interference Ratio (SIR) of the ITB. This enables efficient energy harvesting and stable information transmission. The corresponding energy storage power and communication rate can be balanced and regulated by the decoupling circuit. 【Conclusion】The receiving circuit can operate without an external power supply and features maximum power point tracking, low power consumption, and adjustable operating modes.

Key words: SLIPT; PV; EH; IT; circuit design

收稿日期:2024-04-01; 修回日期:2024-04-29; 纸质出版日期:2025-04-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62075146,62120106001);江苏省自然科学基金资助项目(BK20231311)

作者简介:涂俊轩(1999-),男,湖北黄冈人。硕士,主要研究方向为可见光通信系统关键技术与应用研究。

通信作者:吴绍龙,教授。E-mail:shaolong.wu@suda.edu.cn。李孝峰,教授。E-mail:xfli@suda.edu.cn

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

0 引言

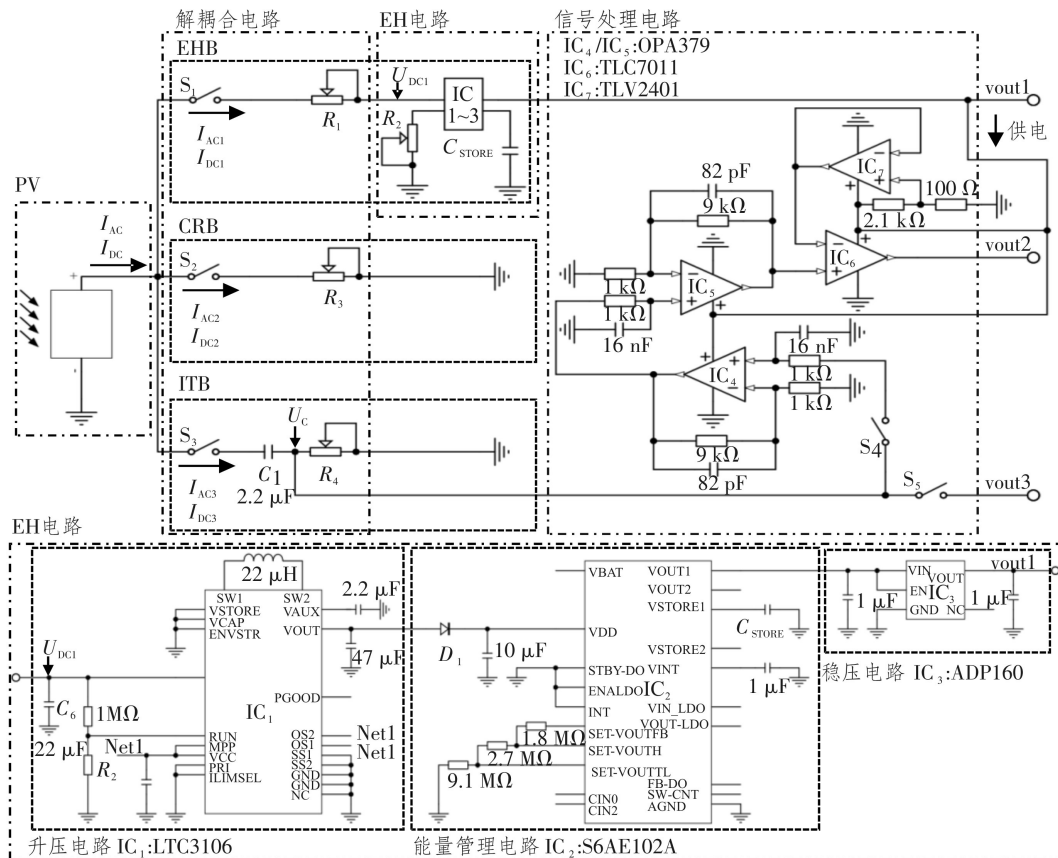
光信息与能量同步传输 (Simultaneous Light-wave Information and Power Transfer, SLIPT) 系统通常以光伏电池 (Photovoltaic Cell, PV) 为接收器件^[1-4], 在实现信息传输 (Information Transmission, IT) 的同时, PV 因有效面积大和光/电转换效率高优势, 相较于光电探测器更适合用于能量采集 (Energy Harvesting, EH)^[5-6], 在无线物联网设备 (如海底传感器节点) 领域具有很大的应用潜力^[7-8]。SLIPT 系统接收电路主要分为两种, 一种利用电容和电感作为功率分配器, 利用电阻模拟 EH 和 IT 过程^[9]; 另一种利用升压电路进行 EH, 在升压电路和 PV 之间串联一个电阻^[10], 并将放大电路接入电阻两端用于 IT。Sephehvand 等人在第 1 种电路的基础上研究了 EH 过程中的容性问题, 从 PV 输出电压对等效结电容和输出功率影响的角度在理论上分析了 EH 和 IT 之间的均衡^[11]; Kadirvelu 等人在第 2 种电路的基础上测试了升压电路的

工作参数对 EH 和 IT 的影响^[12]。上述研究基于所设计的简易电路初步讨论了 EH 与 IT 之间的均衡。然而这些电路需要电源和驱动电路等外加模块才能工作, 无法反映实际工作时 EH 与 IT 之间的关系, 对两者之间调控方式的理解也不够深入。

本文设计了一种用于 SLIPT 系统的新型接收电路, 归纳了 EH 和 IT 之间的均衡方式, 并对不同工作模式的性能参数进行了评测。本研究有助于 SLIPT 系统在不同情境下的功能切换与参数调控, 能够满足用户的不同使用需求, 对 SLIPT 系统的实际部署具有参考意义。

1 SLIPT 系统接收电路设计

SLIPT 系统中 EH 和 IT 两个功能无法同时处于最大功率点 (Maximum Power Point, MPP) 和最佳信息点 (Best Information Point, BIP)^[11], 本文针对该问题对 SLIPT 系统进行了深入研究。图 1 所示为本文设计的接收电路。



注: I_{AC}/I_{DC} 为 PV 输出交/直流电流信号; I_{AC1}/I_{DC1} 、 I_{AC2}/I_{DC2} 和 I_{AC3}/I_{DC3} 分别为流经能量采集支路 (EHB)、电路调控支路 (CRB) 和信息传输支路 (ITB) 的交/直流电流信号; U_{DC1} 为输入至 EH 电路的电压信号; v_{out1} 为 EH 电路输出电压信号; v_{out2} 为 IT 电路输出电压信号; U_C 为 R_4 两端电压; v_{out3} 为 ITB 输出电压信号。 R_1 、 R_3 和 R_4 分别为 EHB、CRB 和 ITB 的电流调节电阻; R_2 为 MPP 调节电阻; C_1 为 ITB 隔直流电容; C_6 、 C_{STORE} 分别为升压电路和能量管理电路储能电容; D_1 为肖特基二极管; Net1 为电器连接网络。

图 1 本文设计的接收电路

Figure 1 The receiver circuit designed in this paper

PV 输出至 EHB、CRB 和 ITB, EH 电路和信号处理电路分别从 R_1 、 R_3 和 R_4 的一端接入。SLIPT 系统工作模式分为 3 种: S_1 闭合且 S_2 和 S_3 断开时只进行 EH, 为 EH 模式; S_1 和 S_5 断开且 S_2 、 S_3 和 S_4 闭合时只进行 IT, 为 IT 模式; S_2 和 S_4 断开且 S_1 、 S_3 和 S_5 闭合时 EH 和 IT 同时进行, 为信息与能量同时传输模式。本设计舍弃了电感, 有利于接收电路的集成, 分支路的输出方式有利于工作模式的切换和各支路输出电流的分配研究。信号处理电路包括两级低通放大电路(增益为 40 dB, 截止频率为 10 kHz)和阈值比较电路(判定门限为 150 mV), 用于 R_4 两端电压 U_C 的放大、滤波和整形。由于 EH 电路输出电压信号 v_{out1} 恒正且功率有限, 采用单电源供电的方式减小了信号处理电路的功耗和复杂度。EH 电路利用极低功率便能启动, 用于 MPP 调节、电能管理和稳压输出, 存储元件 C_{STORE} 为超级电容器。

2 SLIPT 系统数据测试与应用分析

2.1 系统整体框架

图 2 所示为 SLIPT 系统整体框图, 包括发射端和接收端。计算机通过串口模块与单片机通信, 驱动电路可以提高单片机的驱动能力, 使发光二极管(Light Emitting Diode, LED)充分发光^[12]; LED 模块由 5 个相互独立的白光 LED 组成, 每个 LED 的开关可以单独控制。单片机用于电信号的调制解调和编码译码, 当发射端单片机输出信号加载到驱动电路上时驱动 LED 模块发出可见光, 经自由空间信道传输后, 光能量与光信号被 PV 接收并转化为电能与电信号。实测 LED(额定功率为 1 W)和 PV(4.4 cm×3.0 cm)的 -3 dB 带宽分别为 0.8 MHz

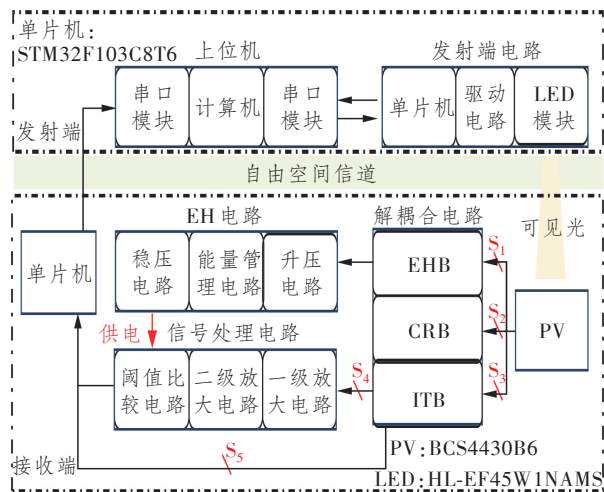


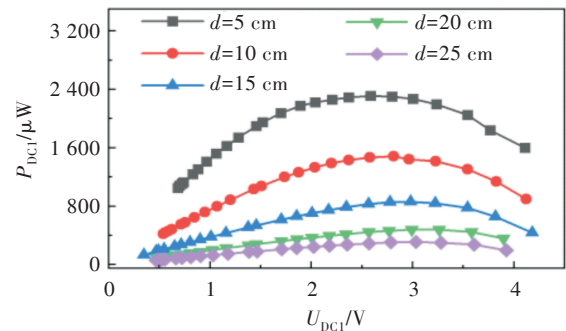
图 2 SLIPT 系统整体框架图

Figure 2 The overall frame diagram of SLIPT system

和 12.8 kHz。本文利用该系统对接收端的电流调控规律、EH 和 IT 两个功能的实现以及两者的相互影响关系和调控方式进行测试。除 $R_1 \sim R_4$ 和 C_{STORE} 需要单独调节外, 接收电路的元件参数已在图 1 中标注。

2.2 接收电路电流调控规律测试与分析

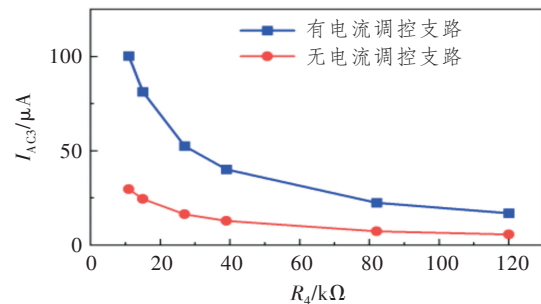
首先调节发射端, 3 种工作模式的 LED 电功率分别为 929、743 和 743 mW, 通信距离 d 不作为变量时设为 20 cm, R_2 在 360 k Ω ~10 M Ω 间变化, R_1 和 R_3 在 0~100 k Ω 间变化, R_4 在 10~120 k Ω 间变化。当系统工作在 EH 模式时, 将 R_1 调至最小以降低发热功率。图 3 显示随着 d 的增大, P_{DC1} 最高点对应的横坐标逐渐右移, 即 MPP 对应的 U_{DC1} 逐渐增大。通过改变 R_2 调节 U_{DC1} 在 R_2 上的分压值, 该值与 IC₁ 内部阈值比较而使 U_{DC1} 保持动态平衡, 进而让 PV 持续地工作在 MPP 附近。当系统工作在 IT 模式时, 图 4 证明 CRB 的设计能增大 I_{AC3} 。如图 5 所示, 调节 R_3 能使 ITB 工作在 BIP, U_C 随着 R_4 的增大而增大, BIP 对应的 R_3 不变。当系统工作在信息与能量同时传输模式时, 如图 6 所示, I_{DC1} 和 I_{AC1} 随着 R_1 的增大而减小, I_{AC3} 先增大后减小, 即调节 R_1 可使 ITB 工作在 BIP 并影响 EH 性能。



注: P_{DC1} 为流经 EHB 的直流电流信号 I_{DC1} 和输入至 EH 电路的电压信号 U_{DC1} 的乘积。

图 3 d 对 MPP 的影响

Figure 3 The influences of d on the MPP



注: I_{AC3} 为流经信息传输支路(ITB)的交流电流信号。

图 4 CRB 对 I_{AC3} 的影响

Figure 4 The influences of CRB on the I_{AC3}

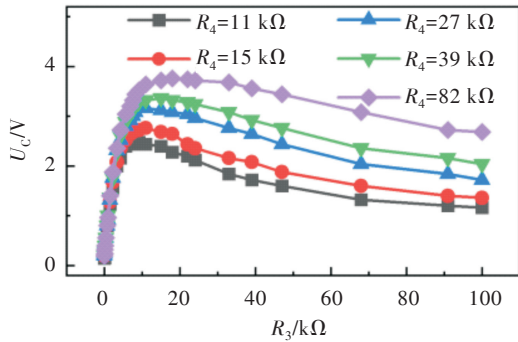
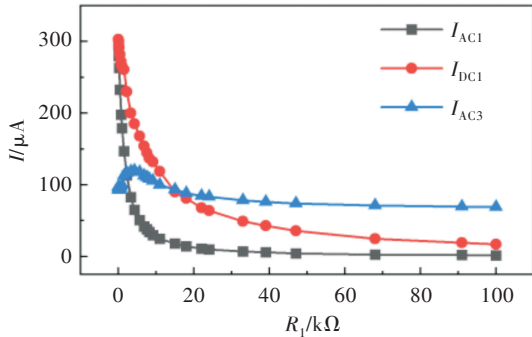


图5 R_4 对 U_C 的影响

Figure 5 The influences of R_4 on the U_C



注: I 为 SLIPT 系统工作在信息与能量同时传输模式时 PV 输出到 EHB、CRB 和 ITB 的电流 I_{AC1} 、 I_{DC1} 和 I_{AC3} 。

图6 R_1 对电流 I 的影响

Figure 6 The influences of R_1 on the current I

2.3 EH 与 IT 两种功能的均衡测试与分析

通过随机数字传输(Random Number Transmission, RNT)测试 EH 与 IT 之间的关系。利用单片机的脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)模块完成随机数字的调制并输出到驱动电路来驱动 LED 模块发光。通过改变脉冲信号的周期来调节通信速率,占空比不变。利用单片机的输入捕获模块判定脉冲信号的占空比将信号解调。随机数字的数据帧包含 1 个起始信号脉冲、14 个数据信号脉冲和 1 个终止信号脉冲。起始信号脉冲和终止信号脉冲的占空比分别为 60% 和 30%。数据信号为二进制数据“1”和“0”,脉冲信号占空比分别为 40% 和 35%。通过上位机来计算 RNT 的误码率(Bit Error Ratio, BER),通过示波器测试 ITB 输出信号的信干比(Signal to Interference Ratio, SIR), SIR 的计算式为^[13]

$$SIR = 20 \lg \left(\frac{U_s}{U_i} \right),$$

式中: U_s 为随机数字信号的有效值; U_i 为 EH 电路中 C_6 充放电(如图 1 所示)带来的干扰信号有效值。 C_6 会周期性充放电使 U_{DC1} 动态地维持在 MPP。

图 7 所示为干扰信号、随机数字信号和干扰信号与随机数字叠加信号的波形,干扰信号的上升沿会使随机数字信号上移。

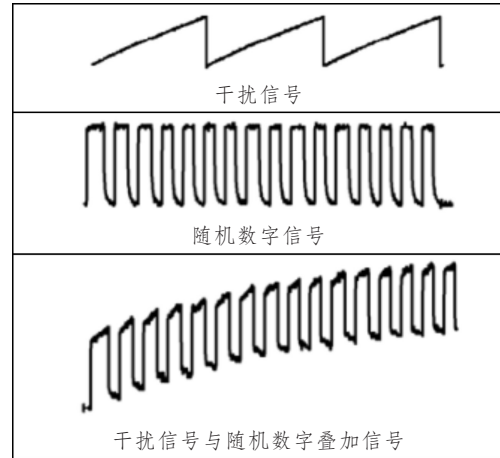


图7 ITB 输出波形

Figure 7 The output waveform of ITB

为了使 RNT 正常进行,改变 R_1 和 R_2 来调节电流的分配,通过调节干扰信号和随机数字信号的强度来调节 ITB 的 SIR,但 R_1 的发热功率(P_1)使 EH 功率(P_{DC1})降低,且 SIR 会限制系统的通信速率。图 8 所示为 SLIPT 系统的均衡测试结果。由图 8(a)可知,SIR 随着 R_1 的增大而增大,干扰信号对 RNT 的影响逐渐减小, P_1 先增大后减小,但 P_{DC1} 不断减小。由图 8(b)可知, P_{DC1} 随着 U_{DC1} 的增大(R_2 减小)先增大后减小, P_1 和 SIR 不断减小。因此 R_1 和 R_2 影响着 EH 与 IT 之间的均衡。为了量化 R_1 和 R_2 的影响,在 20 cm 的距离下调节 R_1 和 R_2 来测试 SLIPT 系统的能量存储功率 P_{STORE} 和通信速率 Rate 等性能指标之间的关系。当 $BER < 3.8 \times 10^{-3}$ 时,如图 8(c)所示, P_{STORE} 随着 U_{DC1} 的增大(R_2 减小)而增大,但 Rate 不断减小。如图 8(d)所示,SIR 随着 R_1 的增大而增大,但 P_{STORE} 不断减小。

由上述测试可归纳出 EH 与 IT 之间的调控原则:信息与能量同时传输时,两种功能相互制约,在两种功能同时需要时,即 BER 低于前向纠错阈值(3.8×10^{-3})且输入电能被 C_{STORE} 存储时,若优先考虑 IT,可增大 R_2 (减小 U_{DC1})或 R_1 ,此时 Rate 和 SIR 增大, P_{STORE} 减小;若优先考虑 EH,可减小 R_2 (增大 U_{DC1})或 R_1 ,此时 P_{STORE} 增大,Rate 和 SIR 减小。其中, R_2 在 0.82~10.00 MΩ 之间变化, R_1 在 4.3~47.0 kΩ 之间变化, $R_2 < 0.82$ MΩ 或 $R_1 < 4.3$ kΩ 时,输入捕获无法判定脉冲信号; $R_2 > 10$ MΩ 或 $R_1 > 47$ kΩ 时, P_{DC1} 过低使 EH 电路无法启动,系统工作条件发生变化,IT 无法进行。

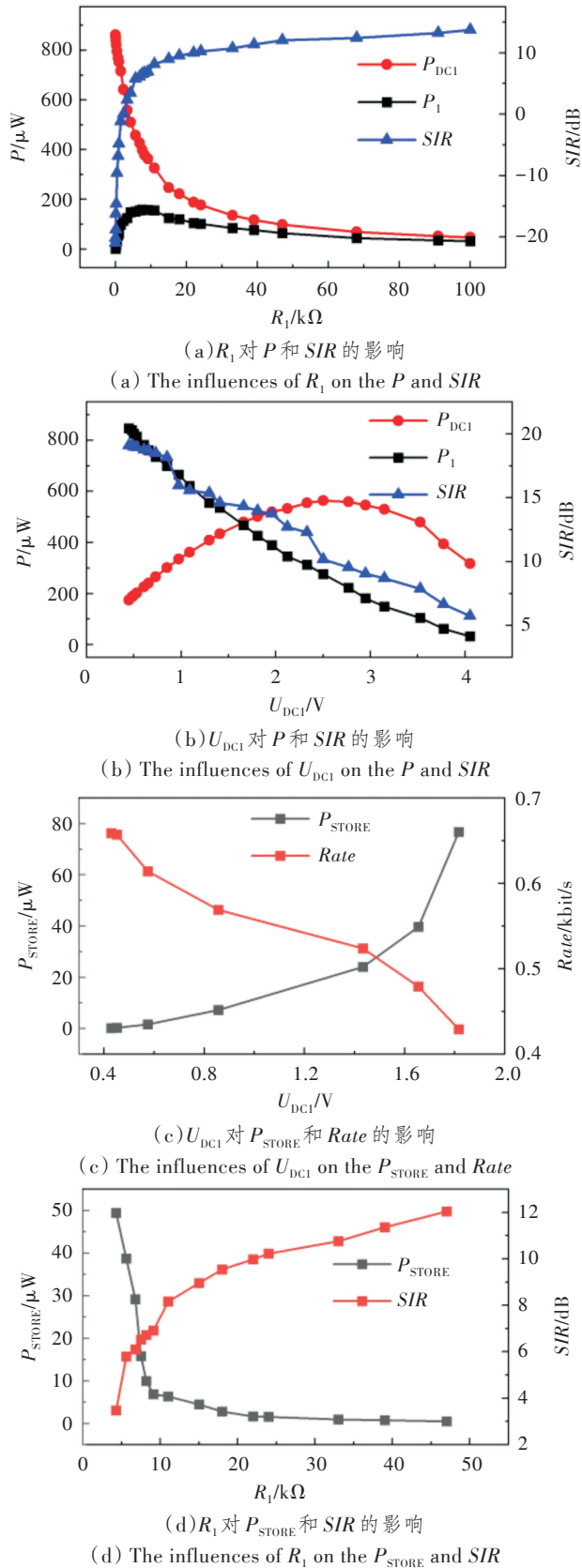


图 8 SLIPT 系统的均衡测试结果

Figure 8 The balance test results of SLIPT system

2.4 EH 与 IT 功能的实用性分析及展望

根据物联网设备的实际工作需求,SLIPT 系统

可分为两种工作状态,分时传输状态下 EH 和 IT 不同时进行,同时传输状态下 EH 和 IT 同时进行。图 9 所示为 SLIPT 系统功能测试实物图,3 种工作模式下 LED 模块总的电功率分别为 3.0、2.4 和 2.7 W, C_{STORE} 为 10 mF。

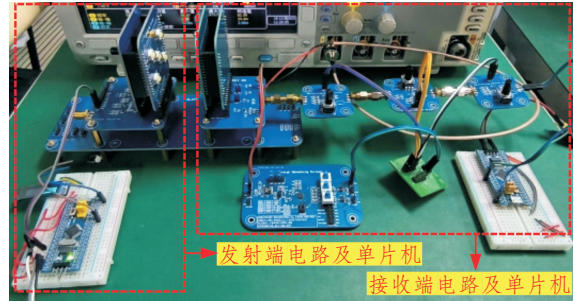


图 9 SLIPT 系统功能测试实物图

Figure 9 The physical diagram of functional tests in the SLIPT system

表 1 所示为分时传输测试结果。系统首先工作在 EH 模式,通过比较 P_{DC1} 与 P_{STORE} 测得能量存储效率为 72%。 C_{STORE} 充满后为信号处理电路供电,系统工作在 IT 模式,在多次测试下 BER 均低于前向纠错阈值。表 2 所示为在接收端电源受限前提下的同时传输测试结果。将接收端单片机直接接入 ITB(如图 1 所示),此时接收端无需外加电源,利用 EH 与 IT 之间的调控规律,通过调节电路参数,可使 $Rate$ 与 P_{STORE} 分别提升至 0.659 kbit/s 和 6.72 μ W。 T_{STORE} 、 U_{STORE} 和 W_{STORE} 分别为 C_{STORE} 的充电时间、电压和存储电能。

表 1 分时传输测试结果

Table 1 The test results for time-sharing transmission

变量	结果	变量	结果
d/m	1	U_{STORE}/V	4.513
$R_2/k\Omega$	430	W_{STORE}/mJ	101.8
$R_3/k\Omega$	15	$P_{DC1}/\mu W$	117.82
$R_4/k\Omega$	39	$P_{STORE}/\mu W$	84.83
T_{STORE}/min	20	$Rate/kbit/s$	2.077

表 2 同时传输测试结果

Table 2 The test results for simultaneous transmission

变量	结果	变量	结果
d/m	20	U_{STORE}/V	1.833
$R_1/k\Omega$	15	W_{STORE}/mJ	16.8
$R_2/M\Omega$	1.1	$P_{STORE}/\mu W$	32.94
$R_4/M\Omega$	0.82	$Rate/kbit/s$	0.659
T_{STORE}/min	8.5	BER	<0.0038

由测试结果可知,EH 和 IT 单独进行或分时进行时,SLIPT 系统适合应用于室内周期性或非连续

性工作的物联网应用,如需要周期性监测温湿度的物联网终端。EH和IT同时进行且存储电能作为接收端的唯一电源时,由于通过EH得到的电能有限,需要牺牲系统的性能来降低功耗,导致Rate和 P_{STORE} 偏低,此时同时传输更适合某些特定的应用场景,例如利用无人机搭载大功率激光,与在水下或沼泽地等恶劣环境下作业的终端实现信息与能量的同时传输,在该场景下 P_{STORE} 和Rate较高;存储电能仅作为补充电源时,采取更加高阶的调制方式和设计更为复杂的信号处理电路可以使Rate更高^[14],此时SLIPT系统的同时传输会有更广阔的应用空间。

3 结束语

本文提出并证实了一种用于SLIPT系统的接收电路设计,该电路能够便捷地切换或高效地兼顾EH和IT两种功能。从电流调控的角度出发,通过调节本文设计电路的关键参数来调控PV的输出电流分配,从而使SLIPT系统工作在期望状态。此外,本文通过RNT测试量化分析了EH与IT的性能参数及两者之间的相互影响关系,总结了两者之间的调控原则。最后,本文通过测试接收电路的EH和IT功能,还对SLIPT系统的实用性进行了分析和展望。本文所设计的接收电路、总结的电流调控方法和分析的3种工作模式为SLIPT系统走向实际应用提供了一种具体的电路参考方案和性能调控方法。

参考文献:

- [1] Pan G, Diamantoulakis P D, Ma Z, et al. Simultaneous Lightwave Information and Power Transfer: Policies, Techniques, and Future Directions[J]. IEEE Access, 2019, 7: 28250–28257.
- [2] Alamu O, Olwal T O, Djouani K. Simultaneous Lightwave Information and Power Transfer in Optical Wireless Communication Networks: An Overview and Outlook[J]. Optik, 2022, 266: 169590.
- [3] Mohsan S A H, Qian H, Amjad H. A Comprehensive Review of Optical Wireless Power Transfer Technology[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2023, 24(6): 767–800.
- [4] 张丽娟,夏艳,赵茜,等.基于SLIPT的水下自供电光通信系统设计[J].光通信研究,2024(3):230122.
Zhang L J, Xia Y, Zhao Q, et al. Design of Underwater Optical Communication System based on Simultaneous Light-wave Information and Power Transmission[J]. Study on Optical Communications, 2024(3):230122.
- [5] Lei W, Chen Z, Xu Y, et al. Negatively Biased Solar Cell Optical Receiver for Underwater Wireless Optical Communication System with Low Peak Average Power Ratio[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(4): 7344109.
- [6] Xiong M, Liu Q, Liu M, et al. Resonant Beam Communications with Photovoltaic Receiver for Optical Data and Power Transfer[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(5): 3033–3041.
- [7] 知达.中国物联网产业生态报告[J].互联网周刊,2017(7):46–54.
Zhi D. Ecological Report of Internet of Things Industry in China[J]. China Internet Week, 2017(7): 46–54.
- [8] Elahi H, Munir K, Eugeni M, et al. Energy Harvesting towards Self-powered IoT Devices[J]. Energies, 2020, 13(21): 5528.
- [9] Wang Z, 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.
- [10] Fan X, Leon-Salas W D. A Circuit for Simultaneous Optical Data Reception and Energy Harvesting [C]//2017 IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS). Boston, MA, USA: IEEE, 2017: 8053052.
- [11] Sepehrvand S, Theagarajan L N, Hranilovic S. Rate-power Trade-off in Simultaneous Lightwave Information and Power Transfer Systems[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(4): 1249–1253.
- [12] Kadirvelu S, Leon-Salas W D, Fan X, et al. A Circuit for Simultaneous Reception of Data and Power Using a Solar Cell[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2021, 5(4): 2065–2075.
- [13] 金哲怡,毕美华,滕旭阳,等.基于多波长分组的无源光网络故障监测系统设计及系统抗干扰性能分析[J].光学学报,2024,44(1):428–437.
Jin Z Y, Bi M H, Teng X Y, et al. Design and Anti-interference Analysis of Fault Monitoring System based on Multi-wavelength Grouping for Passive Optical Network System[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(1): 428–437.
- [14] Das S, Poves E, Fakidis J, et al. Towards Energy Neutral Wireless Communications: Photovoltaic Cells to Connect Remote Areas[J]. Energies, 2019, 12(19): 3772.