

基于角反射可见光通信的净零能耗物联网技术与实验验证

吴佳泽¹, 马营略¹, 杨易衡¹, 赵庭筠¹, 林晨轩¹, 张苏婉¹, 吴希平^{1,2}, 王承祥^{1,2}

(1. 东南大学信息科学与工程学院移动通信全国重点实验室, 江苏 南京 211189; 2. 紫金山实验室, 江苏 南京 211111)

摘要: 随着6G时代临近, 物联网终端设备数量急剧增长, 其电池消耗和维护成本也大幅上升, 因此实现净零能耗成为推动物联网终端设备普及的关键技术需求之一。可见光通信作为近年来兴起的一种绿色通信技术, 能够有效利用现有的照明光源承载下行链路信息, 终端设备则可以利用太阳能电池板同时获取信息与能量。然而, 传统可见光通信的上行链路通常采用红外通信技术, 对终端设备的能耗需求较大, 使其难以达成净零能耗目标。为此, 结合基于太阳能电池板的可见光通信和基于角反射的被动式可见光通信, 提出了一种新颖的净零能耗物联网技术方案, 并搭建了原型机。该方案从增强能量采集效率和降低无线传输能耗两方面, 实现物联网终端设备的净零能耗目标。实验结果表明, 该原型机在室内自然光照环境下可实现50 cm以上的传输距离, 下行和上行传输速率分别达到4 300 bit/s和50 bit/s, 适用于包括智能门锁在内的短距离、低速率传输物联网应用场景。此外, 由于采用了被动式上行链路传输方式, 终端设备达到净零能耗所需的太阳能电池板面积从615 mm²降至125 mm², 大幅提升了终端设备的部署灵活性。

关键词: 物联网; 净零能耗; 可见光通信; 可见光后向散射通信; 太阳能能量采集

中图分类号: TN929.1

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.WLW25160

Research on VLBC-based net-zero-energy IoT with experimental verification

Wu Jiaze¹, Ma Yinglve¹, Yang Yiheng¹, Zhao Tingyun¹, Lin Chenxuan¹, Zhang Suwan¹,

Wu Xiping^{1,2}, Wang Chengxiang^{1,2}

1. National Mobile Communications Research Laboratory, School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China

2. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China

Abstract: As the 6G era approaches, the number of Internet of things (IoT) terminal devices has rapidly increased, leading to a significant increase in battery consumption and maintenance costs. As a result, achieving net-zero energy consumption has become one of the key technical requirements for promoting the widespread adoption of IoT terminals. Visible light communication (VLC), as an emerging green communication technology in recent years, can effectively utilize existing lighting sources to carry downlink information, while terminal devices can use solar panels to simultaneously acquire both information and energy. However, traditional VLC uplinks typically rely on infrared communication technology, which imposes higher energy demands on terminal devices, making it difficult to achieve the goal of net-zero energy consumption. Accordingly, a novel net-zero energy IoT technology solution was proposed, which integrated solar-panel-based visible light communication with retroreflector-based passive visible light communication, and a prototype was con-

收稿日期: 2025-10-20; 修回日期: 2026-05-05

通信作者: 吴希平, xiping.wu@seu.edu.cn

基金项目: 江苏省大学生创新创业项目 (No. S202510286207); 东南大学移动通信全国重点实验室自主研究经费资助项目 (No. 2026A05)

Foundation Items: Jiangsu Provincial College Students Research Training Program (No. S202510286207), The Research Fund of National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University (No. 2026A05)

structed. This solution aimed to achieve net-zero energy consumption for IoT terminal devices by enhancing energy harvesting efficiency and reducing wireless transmission energy consumption. Experimental results showed that the prototype could achieve a transmission distance of over 50 cm under indoor natural lighting conditions, with downlink and uplink transmission rates reaching 4 300 bit/s and 50 bit/s, respectively, making it suitable for short-range, low-rate IoT application scenarios such as smart locks. Furthermore, due to the adoption of passive uplink transmission, the required solar panel area for achieving net-zero energy consumption in terminal devices was reduced from 615 mm² to 125 mm², significantly enhancing the deployment flexibility of the terminal devices.

Key words: IoT, NZE, VLC, VLBC, solar energy harvesting

0 引言

物联网 (IoT, Internet of things) 作为继个人计算机、互联网之后引领第三次信息革命的重要载体, 已逐步成为全球数字化转型的核心技术之一^[1-3]。Statista 2024 年的报告显示, 全球物联网设备数量将从 2023 年的 159 亿台增至 2030 年的 321 亿台, 增长幅度预计超 100%。到 2033 年, 中国预计将拥有全球最多的物联网设备, 数量约达 80 亿台^[4]。目前, 物联网已广泛应用于可穿戴设备、智能家居、智能汽车、智慧城市与工业物联网等领域^[5-7], 提高了人们的生活质量与生产效率。然而, 随着物联网设备的普及, 其能源消耗问题也日益凸显。以物联网设备的数量和每台设备的平均耗电量估算, 全球物联网设备每年会消耗数十亿节电池, 导致电池制造、更换和废弃量激增^[8-10]。为此, 爱立信公司在 2022 年提出了“净零能耗”物联网的概念, 通过获取外部能量的方式让物联网终端设备达到能量的“收支平衡”, 从而在设备的生命周期内不再需要更换电池。

拥有高转化效率 (18%~26%) 的太阳能电池板, 作为能量采集的主要方式之一, 已在众多物联网设备上得到普及。与此同时, 太阳能电池板还可以与近年来兴起的可见光通信 (VLC, visible light communication) 技术相结合^[11], 成为能够同时获取能量和信息的双重接收载体^[12]。具体而言, 太阳能电池板可以利用光电效应将接收到的光能转化为电流, 并分别将交流成分和直流成分进行处理。其中, 交流部分可用于接收经过调制的光信号并提取所承载的信息, 直流部分可用于获取电能, 并将其存储至储能单元 (如电池、超级电容等) 供物联网终端设备使用^[13]。

然而, 传统 VLC 的上行链路通常采用红外通信技术, 其无线传输需要消耗较高的能量, 这种毫

瓦甚至瓦级的主动发射功耗远超室内弱光环境下的能量采集能力 (微瓦级)。在物联网设备中, 通信模块的能耗通常占设备总能耗的 40%~50%。因此, 降低通信模块的能耗对于减少物联网终端设备的整体能耗至关重要, 也是实现净零能耗目标的关键路径之一^[14-16]。相较于主动式无线传输技术, 被动式无线传输技术可以大幅降低能量消耗, 其基本原理是利用信号反射传输数据。常见的被动式无线传输技术包括射频识别 (RFID, radio frequency identification)、被动 Wi-Fi、可见光后向散射通信 (VLBC, visible light backscattering communication) 等^[17-18]。其中, VLBC 是一种在 VLC 基础上构建的被动式无线传输技术, 其利用液晶快门将上行链路信息加载到下行链路光波, 并通过全反射镜将光波沿原路反射回去^[19]。与红外通信技术相比, VLBC 可以极大降低 VLC 上行链路所需的无线传输能耗, 是填补微弱环境光能量采集与上行通信能耗之间缺口的关键技术^[20]。然而, 受到液晶快门的带宽限制, 其传输速率通常较低 (每秒百比特级别)。目前, VLBC 可应用于包括智能医疗、智能家居、室内定位等短距离、低速率传输物联网应用场景^[21]。

目前, VLC 的相关研究大多聚焦于提升数据传输速率^[22-24]。例如, 文献[22]利用高带宽雪崩光电二极管 (APD, avalanche photodiode) 和正交频分复用 (OFDM, orthogonal frequency division multiplexing) 调制技术, 在实验中实现了超过 1 Gbit/s 的传输速率。文献[23]采用波长分复用技术, 利用 4 种不同颜色的发光二极管 (LED, light-emitting diode) 同时传输数据, 并针对器件的非线性特性进行优化, 从而实现了 15.7 Gbit/s 的超高传输速率。文献[24]使用氮化镓微型 LED 阵列作为光源, 在 20 m 的长距离场景下实现了高达 1.6 Gbit/s 的传输速率。然而, 将 VLC 与能量采集相结合的研究相对较少。文献[25]利用硅基太阳能电池板代替光电二极管 (PD, pho-

表1 VLC与VLBC的研究现状

类别	文献	传输距离/m	调制方式	传输速率/(Mbit·s ⁻¹)	快门速率	优势
VLC	[22]	0.1	OFDM	1 063	N/A	高速率APD
	[23]	1.6	OFDM	15 730	N/A	低成本
	[24]	20	OFDM	1 610	N/A	新型LED阵列
	[25]	2	OFDM	15.03	N/A	能量收集功能
VLBC	[26]	2	8-PAM	6×10^{-4}	200 Hz	像素化多反射器设计
	[21]	1.8	OOK	$< 2 \times 10^{-5}$	20 Hz	高精度定位
	[27]	7.5	PQAM	8×10^{-3}	200 Hz	较高的上行传输速率

odiode)作为接收器,提出了一种可以同时进行信号接收和能量采集的VLC传输方案。实验结果表明,该方案能够在2 m的传输距离下实现约15 Mbit/s的传输速率,验证了在VLC系统中利用太阳能电池板进行数据传输的可行性,但其比特误码率(BER, bit error rate)较高($> 10^{-3}$)。该研究未能分析太阳能电池板的能量收集性能,也未评估其是否可以支持物联网终端设备实现净零能耗目标。

针对VLBC,现有研究主要集中于提升数据传输性能^[21,26-27]。文献[26]采用像素化的多反射器设计,以支持多级信号调制,在实验中采用8脉冲幅度调制,在2 m传输距离下实现了600 bit/s的传输速率,较基于开关键控调制的VLBC,系统性能提升了3倍。文献[21]采用液晶快门调制的反射光进行定位,并通过高精度定位算法设计,使系统能够在160 cm高度下,实现0.25 ms级精确定位。文献[27]创新性地使用液晶快门动态改变可见光的偏振角,实验采用延迟叠加调制和基于极化的正交幅度调制方式,在7.5 m通信距离下实现了8 kbit/s的数据传输速率。然而,现有研究尚未将VLBC与能量收集相结合,且未针对“能量采集一反向散射”这一完整闭环进行系统级能耗建模与实验验证,也未能从增强能量采集和降低无线传输能耗两方面,提出面向物联网设备的一体化传输设计方案。

基于上述研究现状,本文结合基于太阳能电池板的VLC和基于角反射的被动式可见光通信技术,构建一种以实现净零能耗为目标的物联网传输方案。在此基础上,本文搭建了相应的原型机系统。该系统包括完整的可见光下行链路和基于角反射的可见光上行链路,实现了上、下行链路的半双工通信,并在保障通信功能的基础上,对系统功耗进行了优化设计。最终,在实现净零能耗目标的同时,将所需太阳能电池板的面积从615 mm²减小至125 mm²,大幅提升物联网终端设备的部署灵活性。本文的主

要贡献总结如下。

(1)提出了一种新颖的净零能耗物联网传输方案。该方案结合基于太阳能电池板的VLC和基于角反射的被动式可见光通信技术,从增强能量采集效率和降低无线传输能耗两方面,助力物联网终端设备实现净零能耗目标。

(2)设计并搭建了相应的原型机系统,且在不同光照条件下对该原型机的下行和上行链路通信性能、终端设备的能量采集能力及其能耗进行了性能测试与分析,测算了终端设备达到净零能耗目标所需的太阳能电池板面积,最终验证了所提方案的可行性与有效性。

1 系统架构

由于系统支持双向数据交互,两端设备均具备完整的信号发送与接收逻辑,根据两端设备在系统中的具体功能,将带有光源的一端命名为“智慧手电”,将具备反射功能的一端命名为“传感终端”,并搭建了净零能耗物联网传输系统,其结构示意图如图1所示。其中,智慧手电通过调制LED发送光信号,传感终端的太阳能电池板则可以同时获取能量和智慧手电所发出的光信号。在接收到智慧手电发出的指令后,传感终端从连接的传感器读取信息,并通过液晶快门对反射光进行调制,再借助角反射器将调制后的光信号沿原路径返回至智慧手电。智慧手电接收传感终端返回的信号后,经解调解码后将所读取的传感器信息显示在屏幕上。由于上行和下行链路复用了同一光路,为避免干扰,该系统采用半双工方式进行通信。本文所搭建的原型机系统如图2所示,本节将详细说明其具体组成结构及功能实现。

1.1 智慧手电

智慧手电主要有两个功能:一是调制下行链路光信号并发送给传感终端;二是接收传感终端反射

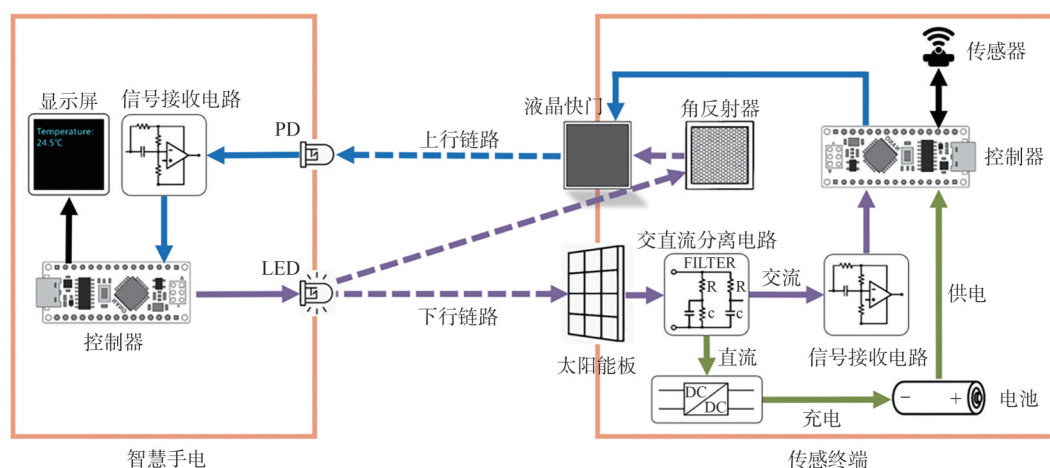


图1 净零能耗物联网传输系统结构示意图

回的上行链路光信号，解调所加载的信息并将其显示在显示屏上。智慧手电的结构组成如图2(a)所示。智慧手电的控制器采用 Arduino Nano，负责对读取指令进行调制，并直接驱动一个额定电压为 5 V 的 LED 发射该指令，同时接收传感终端返回的信号，并在解调后将相关数据显示在 OLED 显示屏上。

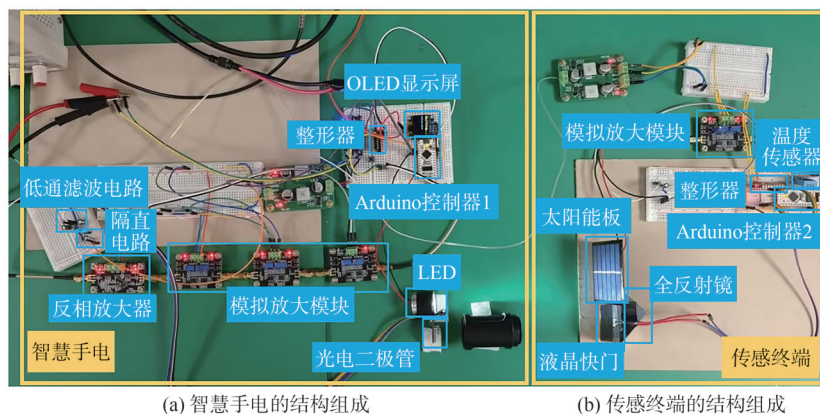
相较于简易的直驱发射端，接收端的结构相对复杂，包含光电二极管 (OPT101)、隔直电路、高通滤波电路、反相放大器 (AD817)、三组模拟放大模块 (TL082+SGM8271) 和一个触发整形器 (74HC14)。其中，光电二极管将传感终端反射回的上行链路光信号转化为电信号；隔直电路和高通滤波电路分别用于抑制由背景光引入的直流分量和低频漂移；反相放大器为滤波后的微弱电信号提供中等带宽线性增益；三组模拟放大模块以级联方式连接，经三级放大后达到触发整形器能够识别的电位水平；触发整形器通过阈值比较与波形整形，输出边沿陡峭、抗干扰能力强的标准 5 V 逻辑电平，实现从模拟波形

到数字波形的转换，确保 Arduino Nano 控制器能够进行可靠采样与判决。整流前与整流后的波形对比如图3所示。

1.2 传感终端

传感终端主要有 3 个功能：一是接收下行链路光信号；二是通过反射和调制光信号将传感器信息发送给智慧手电；三是采集太阳能给电池充电，以保障传感终端运行所需的能量，从而实现系统净零能耗。传感终端的结构组成如图2(b)所示。传感终端的控制器同样采用 Arduino Nano，其负责接收从太阳能电池板输出并经过接收端处理后的交流电信号，以及读取传感器信息并调制加载到液晶快门。

除控制器外，传感终端包含以下三部分电路，分别是发射端、接收端和能量采集单元。发射端包含角反射器（又称全反射镜）和液晶快门。其中，角反射器的作用是将下行链路的光波沿原路径返回，液晶快门则通过电压来改变透光状态，从而对反射光波进行调制。接收端包含太阳能电池板、交直流分离电路、



(a) 智慧手电的结构组成

(b) 传感终端的结构组成

图2 原型机系统

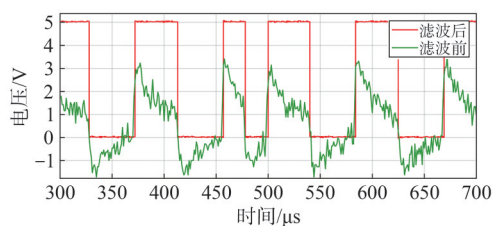


图3 整流前与整流后的波形对比

高通滤波电路、模拟放大模块 (TL082+SGM8271) 和触发整形器 (74HC14)。太阳能电池板将所接收到的光信号转化为电信号, 并通过分离电路分成直流和交流分量。交流分量包含下行链路信息, 经与智慧手电相同的接收电路处理后传递至控制器; 直流分量则通过能量采集电路给电池充电。

本文设计的能量采集电路结构如图4所示, 主要包含软启动模块、充电管理芯片 (BQ25570)、锂电池 (18650) 以及多级 DC-DC 变压模块。其中, 软启动电路的作用是抑制直流分量中的浪涌电流; 充电管理芯片用于保障输出电压达到锂电池充电阈值后再进行充电, 防止出现逆冲电流, 并维持恒定的充电电压; 锂电池的满充电压为 3.65 V, 额定容量为 3 000 mAh, 作为系统储能单元; DC-DC 变压模块对锂电池的输出电压进行变换, 提供传感终端所需的 12 V 与 ± 9 V 电压输出, 为控制器、运算放大器和传感器提供稳定可靠的电源。

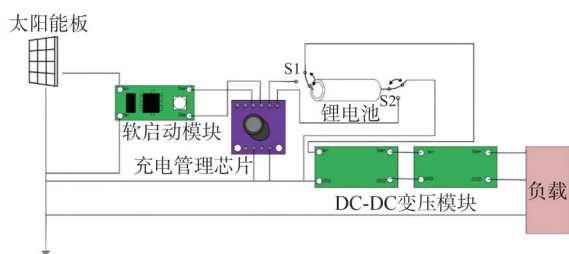


图4 能量采集电路结构

2 系统模型

本节将详细阐述系统的通信链路调制机制, 并建立信道模型, 对系统的平均信噪比、比特误码率以及信道容量进行理论推导与分析。

2.1 通信链路调制机制

在下行链路中, 系统采用基于曼彻斯特编码的 OOK 调制方式, 将比特 1 映射为“高-低”电平组合, 将比特 0 映射为“低-高”电平组合。下行链路的数据帧结构为: 首先发送一个 32 bit 的前导码, 该

码由交替的“1”和“0”组成, 用于传感终端的时钟同步与时序锁定; 随后发送 4 bit 帧起始符, 标识前导序列的结束与数据序列的开始; 最后发送 16 bit (本实验中设定长度) 的数据序列。传感终端则依据前导码完成时钟同步, 在识别帧起始符后确定数据序列的起始位置, 进而解析后续传输的数据信息。传感终端对下行链路信号的解码步骤如下。

步骤1: 传感终端采用“定时采样+滑窗匹配”方式对接收到的曼彻斯特信号进行定位与解码。具体而言, 以本地半比特周期为节拍对输入引脚进行连续采样, 把所获取的电平值填入一段长度固定的缓冲区。该缓冲区的长度足以覆盖前导末端、帧起始符以及后续数据比特序列。由于前导序列只用作时钟同步, 接收端不用对前导序列进行解析。

步骤2: 完成缓冲区域的采样后, 解析算法将滑动起点, 对每一个候选起点, 按照曼彻斯特“首半位决定比特值”的规则, 将连续 4 个采样结果还原为比特, 并与预设的帧起始符进行比较。当成功匹配到帧起始符时完成对齐操作, 并将此处作为数据序列的起始位。如果在当前缓冲区域内没有能够匹配到有效的帧起始符, 则重新进行采样, 直到在超时之前成功匹配或达到超时为止。

步骤3: 当确定数据序列的起始位后, 传感终端将按两个半比特的步长前进, 对随后的数据序列进行解码, 输出有效的比特信息。

上行链路同样采用基于曼彻斯特编码的 OOK 调制方式, 但与下行链路的不同之处在于, 上行调制通过液晶快门实现。液晶快门的开关响应时间在毫秒量级, 高频传输会导致失真、残影及占空比失控等问题。因此, 上行链路的传输速率设定为 50 bit/s, 其对应的比特周期 $T_{\text{bit}}=20$ ms (半比特周期为 $T_{1/2}=10$ ms), 以确保液晶快门可以正常地调制光波。

智慧手电接收到的上行链路信号及基于边沿计时的分类结果如图5所示。光学反射与调制过程中存在信号混叠问题, 导致数据序列长度不一致, 使得传统方法难以有效恢复比特信号。因此, 本文提出一种基于边沿计时的非均匀采样解码方法。该方式通过对接收信号相邻翻转边沿的时间间隔进行计时, 并结合半比特周期进行自适应估计 (设为 t_h , 其初始值为 $T_{1/2}$), 从而判定当前翻转是比特中点还是比特边界。首先, 根据其间隔 (设为 d) 对采集到的原始方波信号进行分类, 分类阈值定义如下:

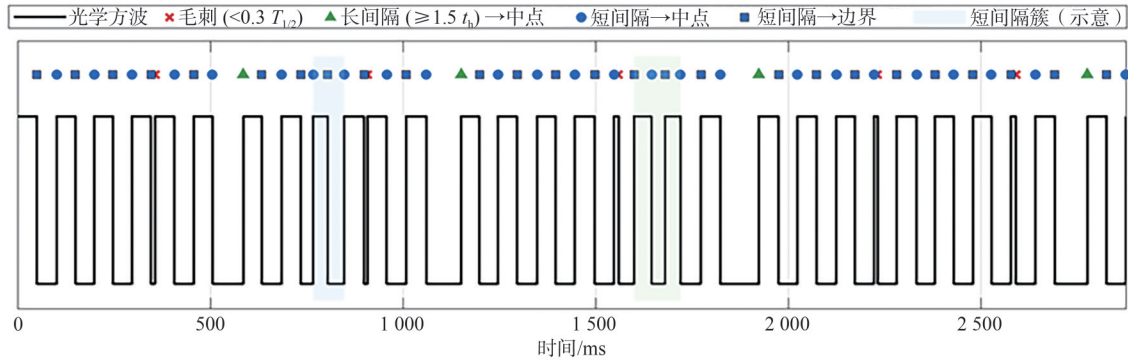


图5 智慧手电接收到的上行链路信号及基于边沿计时的分类结果

当 $d < 0.3 T_{1/2}$ 时, 视作毛刺 (可忽略); 当 $d < 1.5 t_h$ 时, 视作短间隔; 当 $d \geq 1.5 t_h$ 时, 视作长间隔。在解码过程中, 当检测到长间隔时, 将当前翻转处标记为中点, 并将下一翻转设定为边界, 以纠正可能缺失或拖延的边界翻转。当检测到短间隔时, 在边界和中点之间交替推进, 并对 t_h 进行渐进自适应, 用以修正由光路扰动、比较器迟滞导致的有效半比特漂移, 其表达式如下

$$t_h \leftarrow \frac{7 t_h + d}{8} \quad (1)$$

然后, 下行链路接收端以 4 bit 移位寄存器对中点判决序列进行滑动检测, 当识别到特定序列时认为匹配到帧起始符, 并将翻转标记置 0。最后, 移入数据序列并进行解调, 从而获得有效的比特信息。相较于下行链路的解调过程, 上行链路的解调过程不再依赖于固定的采样周期, 且能对信号中的“毛刺”错误进行一定程度的修正, 因而具有更好的鲁棒性。

2.2 信道模型

本文所搭建的原型机系统用于短距离传输, 因此视距路径占据主导, 而非视距路径的影响可被忽略^[28]。此外, 由于采用了面积较大的太阳能电池板, 其不能像光电二极管一样被视为一个单点的接收端, 而需要以多输入多输出 (MIMO, multiple-input multiple-output) 阵列的形式进行考虑。对于一个 $N \times M$ 的 MIMO 系统, 其信道传播矩阵^[29]为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \cdots & h_{1,M-1} & h_{1,M} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \cdots & h_{2,M-1} & h_{2,M} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ h_{N,1} & h_{N,2} & \cdots & h_{N,M-1} & h_{N,M} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, $h_{r,t}$ 为第 r 个发射点 ($r = 1, 2, \dots, N$) 到第 t 个接收点 ($t = 1, 2, \dots, M$) 之间的光信道增益。

根据朗伯模型, 信道传播矩阵中每个元素的光信道增益可表示为^[29]

$$h_{r,t} = \begin{cases} \frac{(m+1)A_r}{2\pi d_{r,t}^2} \cos^m(\varphi_t) G(\varphi_r) T(\varphi_r) \cos(\varphi_r), & 0 \leq \varphi_r \leq \Phi_c \\ 0, & \varphi_r > \Phi_c \end{cases} \quad (3)$$

其中, Φ_c 为接收系统对入射光的角范围上限; $G(\varphi_r)$ 为聚光器增益, 常取 $\frac{n^2}{\sin^2(\Phi_c)}$; n 为聚光器材料的折射率; $T(\varphi_r)$ 为滤光片增益; $m = \frac{\ln 2}{\ln(\cos \Phi_{1/2})}$ 为朗伯辐射常数, $\Phi_{1/2}$ 为半功率角; $d_{r,t}$ 为发射端与接收端之间的距离; A_r 为光电检测器的面积; φ_t 和 φ_r 分别为发射角和入射角。

设 $\bar{P}_t$ 为 LED 用于调制信号的平均发射光功率, $\bar{h}$ 为平均光信道增益, 则平均接收光功率 $\bar{P}_r$ 为

$$\bar{P}_r = \bar{h} \bar{P}_t \quad (4)$$

2.3 平均信噪比分析

设 R 为光电器件的响应度, 则接收到的电压幅度 S 可表示为

$$S = R \bar{P}_r \quad (5)$$

本文所使用的光电二极管 (OPT101) 响应度为 0.45 A/W。假设系统中的噪声均为加性高斯白噪声 (AWGN, additive white Gaussian noise), 前端等效噪声功率可表示为

$$\sigma_n^2 = N_0 B \quad (6)$$

其中, N_0 为双边功率谱密度, B 为噪声带宽。

结合以上表达式, 接收端的平均信噪比 γ 可表示为

$$\gamma = \frac{(R \bar{h} \bar{P}_t)^2}{N_0 B} \quad (7)$$

2.4 比特误码率分析

本文的上、下行链路均采用基于曼彻斯特编码的OOK调制方式。设占空比为 δ , $P_{t, \text{pk}}$ 为峰值发射光功率, 则平均发射光功率为

$$\bar{P}_t = \delta P_{t, \text{pk}} \quad (8)$$

由于采用曼彻斯特编码, 占空比恒定为 $\delta = 1/2$ 。在“高电平”采样点的电信号幅度为

$$A = \frac{R\bar{h}P_{t, \text{pk}}}{\delta} \quad (9)$$

对采用阈值判决的OOK调制(高电平幅度为 A , 低电平幅度为 0), 在噪声为AWGN且先验相等条件下, 最优固定阈值为 $T = A/2$ 。据此, 比特误码率的表达式为

$$P_b = Q\left(\frac{A}{2\sigma_n}\right) \quad (10)$$

其中, $Q(\cdot)$ 为高斯 Q 函数。

代入式(6)~式(8), 可推导出本文所设计传输系统的比特误码率的表达式为

$$P_b^{\text{OOK}} = Q\left(\frac{R\bar{h}P_{t, \text{pk}}}{2\sqrt{N_0 B}}\right) \quad (11)$$

2.5 传输速率的理论上限分析

经典的香农信道容量公式基于双极性高斯输入假设, 不适用于可见光通信系统所采用的强度调制直接检测技术。本文以基于熵功率不等式的信道容量作为理论基准, 针对所设计的单用户通信系统, 在无多址干扰场景下的信道容量上界可表示为^[30]

$$C_{\max} = \frac{1}{2} B \log(1 + \rho h^2) \quad (12)$$

其中, ρ 为发射信号的信噪比, h 为信道增益。

下行链路采用太阳能电池板作为接收器。由于太阳能电池板具有寄生结电容特性, 该结电容 C_j 与负载电阻 R_L 构成了一个等效的低通滤波器, 限制了高频信号的响应能力。因此, 下行链路的有效带宽 B_{DL} 可近似建模为

$$B_{\text{DL}} \approx \frac{1}{2\pi R_L C_j} \quad (13)$$

代入本系统中所使用的硬件参数, 得到下行链路的有效带宽 $B_{\text{DL}} \approx 6.64 \text{ kHz}$ 。

上行链路采用液晶快门进行调制。液晶分子的偏转需要一定的弛豫时间, 这决定了其状态切换的物理极限。设液晶快门的上升时间为 τ_r , 下降时间为 τ_f , 则上行链路的有效带宽 B_{UL} 可表示为

$$B_{\text{UL}} \approx \frac{1}{\kappa(\tau_r + \tau_f)} \quad (14)$$

其中, κ 为由调制阶数决定的常数(对于OOK调制, 通常取 $\kappa \approx 2$)。

代入使用的液晶快门的参数, 得到上行链路的有效带宽 $B_{\text{UL}} \approx 55.6 \text{ Hz}$ 。

计算理论信道增益 h , 并在AWGN模型下计算发射信号的信噪比 ρ , 代入式(12), 可得到下行链路与上行链路的传输速率理论上限分别为 $6\,020 \text{ kbit/s}$ 和 67.9 bit/s 。

3 结果分析

3.1 实验设置

实验场地为一间尺寸为 $12.31 \text{ m} \times 6.13 \text{ m} \times 2.55 \text{ m}$ 的常规办公室, 房间内均匀分布有8盏照明灯, 每个灯具尺寸为 $0.6 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ 、功率为 20 W 。实验考虑两种不同的光照条件: 一是黑暗条件, 即将遮光窗帘完全闭合并将照明灯全部关闭; 二是室内光照条件, 即将遮光窗帘完全拉开并将照明灯全部开启。测试中, 原型机系统位于房间的中央位置, 且每次测试均在以上两种环境下分别进行。

在测量传输距离对比特误码率的影响时, 下行链路的传输速率固定设置为 $1\,200 \text{ bit/s}$, 传输 $1\,000$ 次信号, 每次发送 512 bit , 总计发送 $512\,000 \text{ bit}$; 液晶快门的传输速率固定设置为 50 bit/s , 传输 $1\,000$ 次信号, 每次发送 128 bit , 总计发送 $128\,000 \text{ bit}$ 。在测量传输速率对比特误码率的影响时, 传输距离固定设置为 30 cm 。由于原型机所使用的液晶快门调制频率较低(不超过 10 Hz), 本实验仅测量下行链路传输速率对比特误码率的影响。为满足实际通信需求, 本实验将 1×10^{-3} 作为比特误码率的目标阈值。

3.2 通信性能测试

传输距离对比特误码率的影响如图6所示。在室内光照条件下, 下行链路的最大有效传输距离为 64 cm , 而上行链路的最大有效传输距离为 52 cm , 主要受光路径损耗及液晶快门透光率的限制。在相同传输距离下, 黑暗条件的比特误码率性能优于室内光照条件。例如, 在传输距离为 64 cm 时, 黑暗条件的下行链路比特误码率为 1×10^{-5} , 而室内光照条件下为 1×10^{-3} 。这主要是室内环境光显著增强了光噪声, 导致信噪比下降。

对比图6中的实测结果与理论曲线可知, 实测

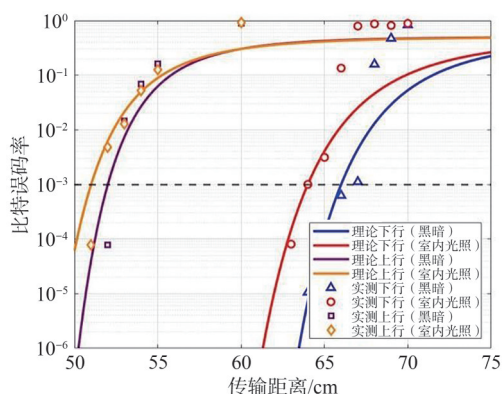


图6 传输距离对比特误码率的影响

数据的整体变化趋势与理论预测基本一致,尤其在近距离(高信噪比)区间吻合度较好,但在远距离(低信噪比)区间,实测误码率高于理论预测值,且这种偏差随着距离增加而增大。产生这一差异的可能原因在于理论模型对实际物理环境的简化:一方面,噪声建模存在偏差,本文的理论模型假设为AWGN信道模型,而实际硬件系统中存在复杂的热噪声与电噪声,特别是在接收距离远、接收光功率较低时,系统固有噪声对信号的干扰成为主导因素,导致接收到的信号质量恶化;另一方面,随着传输距离增加,接收光功率逐渐逼近太阳能电池板的灵敏度阈值,当光信号能量低于器件的最小可探测功率限制时,接收端无法从噪声中有效提取信号,造成解调失效,从而引发远距离比特误码率的增大。

在传输距离固定为50 cm的情况下,下行链路的比特误码率与传输速率的关系如图7所示。随着传输速率的增加,下行链路的比特误码率逐渐上升,这主要是LED带宽限制产生码间干扰所致。在相同传输速率下,黑暗条件下的比特误码率性能显著优于室内光照环境。当传输速率为4 300 bit/s时,

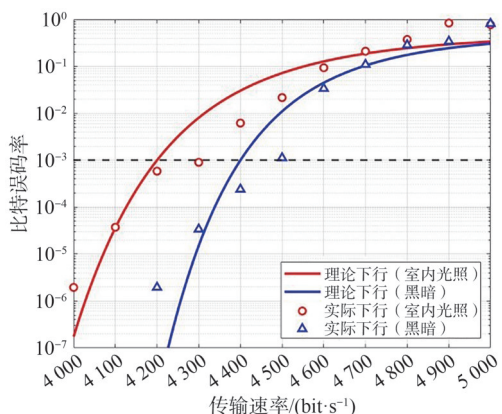


图7 下行链路比特误码率与传输速率的关系

黑暗条件的下行链路比特误码率约为 1.5×10^{-4} ,而室内光照条件下为 1×10^{-3} 。

根据以上分析,原型机系统的功能验证参数选定为:下行链路传输速率为4 300 bit/s,上行链路传输速率为50 bit/s,传输距离为53 cm。在该参数设置下,智慧手电通过按键向传感终端发出指令,液晶屏幕正确显示传感终端返回的温度传感器信息。智慧手电的传感信息显示如图8所示。

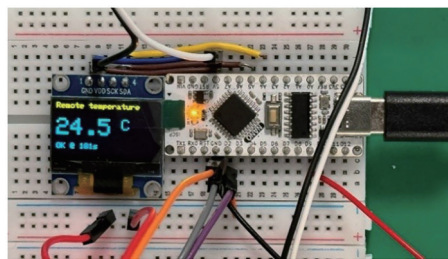


图8 智慧手电的传感信息显示(温度)

将实验测得的传输速率与理论上限进行对比:基于第2.5节中的推导,下行链路与上行链路的理论上限分别为6 020 bit/s和67.9 bit/s,而实验测得的速率分别为4 300 bit/s和50 bit/s,约为理论值的71.4%和73.6%。实测速率未能逼近理论上限的原因在于理论模型与实际系统的差异:(1)本文的信道容量理论推导基于香农信息论框架,通常假设输入信号服从高斯分布或满足平均功率约束的非负连续分布,以最大化信道熵。然而,本文提出的系统受限于OOK调制的离散二进制分布特性,这种信号分布差异带来的整形损失使得信号无法充分利用信道容量,从而导致实测速率低于理论预期;(2)理论模型简化了噪声环境(仅考虑AWGN),忽略了光伏器件引入的散粒噪声、热噪声及电路固有噪声;(3)硬件非理想特性,特别是上行链路中液晶快门的迟滞与角反射器的能量损耗,进一步降低了实际接收信噪比。以上因素共同制约了实际传输速率向理论上限速率的逼近。

3.3 能量采集性能测试

设充电电压为 U_c 、充电电流为 I_c ,则充电功率为 $P_c = U_c I_c$ 。通过测量 U_c 和 I_c ,可以计算太阳能电池板在实际光照条件下的充电功率。不同光照条件下每平方毫米太阳能电池板的充电功率见表2。电池电压与充电时间的关系如图9所示。随着充电时间增加,电池电压逐渐增大并趋于平稳,但在不同光照条件下的充电速率存在显著差异。室外晴天条件

表2 不同光照条件下每平方毫米太阳能电池板的充电功率

光照条件	每平方毫米的充电功率/mW
室内光照	0.014 6
室外阴天(无太阳直射)	0.233 3
室外晴天(有太阳直射)	4.097 9

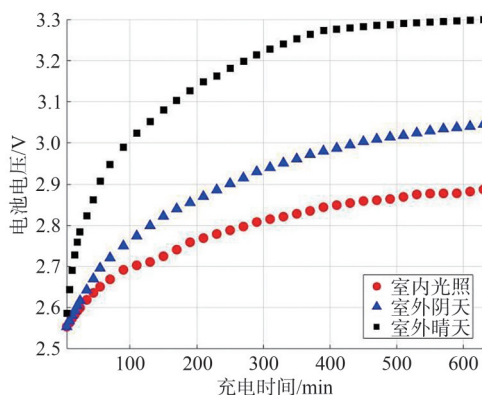


图9 电池电压与充电时间的关系

下,光照强度最高,电池电压上升最快,充电10 h后可达到3.3 V。室外阴天条件下,光照强度减弱,充电速率显著降低,充电10 h后电池电压约为3.04 V。在室内光照条件下,充电速率进一步下降,充电10 h后电池电压不足2.9 V。

在切断太阳能电池板充电后,使用锂电池给传感终端进行供电。在保证系统正常运转的前提下,测试锂电池的放电电压 U_d 与放电电流 I_d ,可得到电池的放电功率 P_d 约为513 mW。结合充电性能分析,在室外晴天条件下,需要面积约125 mm²的太阳能电池板即可实现净零能耗;在室外阴天条件下则需要面积约2 200 mm²的太阳能电池板。传统的VLC为实现双向通信,需在传感终端同样部署主动式发射电路,所需功耗约为2.52 W。因此,在室外晴天条件下实现净零能耗所需的太阳能电池板面积为615 mm²。相比之下,本文所提出的物联网传输方案可以将达到净零能耗目标所需的太阳能电池板面积从615 mm²降低到125 mm²,大幅增加了终端的部署灵活性。

4 结束语

本文结合基于太阳能电池板的可见光通信和基于角反射的被动式可见光通信技术,提出了一种新颖的物联网传输方案,从增强能量采集效率和降低无线传输能耗两方面,实现了物联网终端设备的净零能耗目标。基于此,本文设计并搭建了原型机系统,在不同光照条件下进行了可行性验证与性能测试

分析。实验结果表明,所搭建的原型机可在53 cm的传输距离下,以4 300 bit/s的下行链路传输速率和50 bit/s的上行链路传输速率进行可靠稳定的双向传输(比特误码率达 1×10^{-3})。此外,由于采用了被动式上行链路传输方式,终端设备达到净零能耗所需的太阳能电池板面积从615 mm²降至125 mm²,大幅提升了终端的部署灵活性。

未来的研究将从以下两方面展开:一是进一步探索提升系统的通信性能和能量采集效率;二是设计高集成度的PCB电路板,以降低电路寄生参数的影响,减小终端体积,提升系统的便携性。

参考文献:

- [1] Wang C X, Lv Z, Huang C, et al. An enhanced 6G pervasive channel model towards standardization[J]. Science China Information Sciences, 2025, 68(6): 162301.
- [2] Al-Fuqaha A, Guizani M, Mohammadi M, et al. Internet of Things: a survey on enabling technologies, protocols, and applications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 2347-2376.
- [3] Xu L D, He W, Li S C. Internet of Things in industries: a survey[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(4): 2233-2243.
- [4] Li Y, Guo Y P, Chen S Y. A survey on the development and challenges of the Internet of Things (IoT) in China[C]//Proceedings of the 2018 International Symposium in Sensing and Instrumentation in IoT Era (ISSI). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [5] Zanella A, Bui N, Castellani A, et al. Internet of Things for smart cities[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2014, 1(1): 22-32.
- [6] Agiwal M, Roy A, Saxena N. Next generation 5G wireless networks: a comprehensive survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(3): 1617-1655.
- [7] Riazul Islam S M, Kwak D, Kabir M H, et al. The Internet of Things for health care: a comprehensive survey[J]. IEEE Access, 2015, 3: 678-708.
- [8] Kotsuep N, Puntsri K. Energy consumption analysis of NB-IoT for very large sensors[C]//Proceedings of the 2024 12th International Electrical Engineering Congress (iEECON). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-4.
- [9] Jörke P, Falkenberg R, Wietfeld C. Power consumption analysis of NB-IoT and eMTC in challenging smart city environments[C]//Proceedings of the 2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [10] Rahmani H, Shetty D, Wagih M, et al. Next-generation IoT devices: sustainable eco-friendly manufacturing, energy harvesting, and wireless connectivity[J]. IEEE Journal of Microwaves, 2023, 3(1): 237-255.
- [11] Wu X P, Soltani M D, Zhou L, et al. Hybrid LiFi and Wi-Fi networks: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(2): 1398-1420.

- [12] Das S, Sparks A, Poves E, et al. Effect of sunlight on photovoltaics as optical wireless communication receivers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(19): 6182-6190.
- [13] Bin Omar M F, Hafiy Bin Baderin M I. Development and analysis of a rotating solar panel system with IOT monitoring for voltage and current output[C]//*Proceedings of the 2025 IEEE 5th International Conference in Power Engineering Applications (ICPEA)*. Piscataway: IEEE Press, 2025: 79-84.
- [14] Raza U, Kulkarni P, Sooriyabandara M. Low power wide area networks: an overview[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(2): 855-873.
- [15] Chettri L, Bera R. A comprehensive survey on Internet of Things (IoT) toward 5G wireless systems[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(1): 16-32.
- [16] Reddy K N, Shukla A, Sivasubramanian S, et al. Energy-efficient IoT data aggregation framework using low-power wide-area networks[C]//*Proceedings of the 2024 International Conference on IoT, Communication and Automation Technology (ICICAT)*. Piscataway: IEEE Press, 2024: 986-990.
- [17] Karthaus U, Fischer M. Fully integrated passive UHF RFID transponder IC with 16.7- μ W minimum RF input power[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2003, 38(10): 1602-1608.
- [18] Li W D, Piechocki R J, Woodbridge K, et al. Passive Wi-Fi radar for human sensing using a stand-alone access point[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(3): 1986-1998.
- [19] Ullah M H, Gelli G, Verde F. Visible light backscattering communications in healthcare scenarios: link modeling and performance analysis[C]//*Proceedings of the 2022 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence Systems (IoTIS)*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 179-185.
- [20] Koonen T. Indoor optical wireless systems: technology, trends, and applications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(8): 1459-1467.
- [21] Nazzal M, Sawalmeh A, Shao S H, et al. Retro-VLP: towards single light source-based real-time indoor positioning[C]//*Proceedings of the 2022 13th International Conference on Information and Communication Systems (ICICS)*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 485-490.
- [22] Fan Y F, Chen X Y, Dai Z C, et al. High-speed InGaP/AlGaAs avalanche photodiodes for LED-based visible light communication[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2025, 72(6): 3023-3028.
- [23] Bian R, Tavakkolnia I, Haas H. 15.73 Gb/s visible light communication with off-the-shelf LEDs[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(10): 2418-2424.
- [24] Xie E Y, Bian R, He X Y, et al. Over 10 Gbps VLC for long-distance applications using a GaN-based series-biased micro-LED array[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(9): 499-502.
- [25] Sarwar R, Sun B, Kong M W, et al. Visible light communication using a solar-panel receiver[C]//*Proceedings of the 2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-3.
- [26] Shao S H, Khreishah A, Elgala H. Pixelated VLC-backscattering for self-charging indoor IoT devices[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(2): 177-180.
- [27] Wu Y, Wang P R, Xu K N, et al. Turboboosting visible light backscatter communication[C]//*Proceedings of the Annual Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication on the Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication*. New York: ACM Press, 2020: 186-197.
- [28] Mesleh R, Elgala H, Haas H. Optical spatial modulation[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2011, 3(3): 234-244.
- [29] 宋健, 曹雅丽, 张文胜, 等. 基于新型光源的联合分步映射空间调制可见光通信系统性能分析[J]. *物联网学报*, 2017, 1(2): 54-62.
- Song J, Cao Y L, Zhang W S, et al. Performance analysis of a VLC system with a new light source and joint step-by-step mapping spatial modulation[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2017, 1(2): 54-62.
- [30] Yin L, Popoola W O, Wu X P, et al. Performance evaluation of non-orthogonal multiple access in visible light communication[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(12): 5162-5175.

作者简介



吴佳泽(2003—), 男, 东南大学信息科学与工程学院硕士生, 主要研究方向为工业物联网、光无线通信。



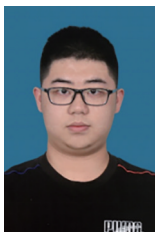
马营略(2005—), 男, 东南大学信息科学与工程学院在读, 主要研究方向为6G无线通信。



杨易衡(2003—), 男, 东南大学信息科学与工程学院在读, 主要研究方向为6G无线通信。



赵庭筠(2005—), 男, 东南大学信息科学与工程学院在读, 主要研究方向为6G无线通信。



林晨轩(2005–)，男，东南大学信息科学与工程学院在读，主要研究方向为6G无线通信。



张苏婉(2005–)，女，东南大学信息科学与工程学院在读，主要研究方向为6G无线通信。



吴希平(1987–)，男，博士，东南大学信息科学与工程学院青年首席教授、紫金山实验室教授、都柏林大学访问教授，主要研究方向为6G移动通信智能组网与优化、人工智能无线通信、光无线通信技术。



王承祥(1975–)，男，博士，东南大学首席教授、副校长、移动通信全国重点实验室副主任、紫金山实验室教授、欧洲科学院院士、欧洲科学与艺术院院士、英国爱丁堡皇家学会院士、IEEE Fellow、IET Fellow、中国通信学会会士。主要研究方向为无线信道测量与建模、6G智能网络架构与关键技术、电磁信息论。