这是发表于 ApplePies 2025 会议论文集中的一篇论文的开放获取作者存档版本。

面向无电池系统的基于太阳能电池板的可见光通信

Juan F. Guti´errez[1,2], Nhung Nguyen[1], Jes´us M. Quintero[2], and Andres Gomez[1]

[1] 布伦瑞克工业大学数据技术与通信网络研究所，Hans-Sommer-Str. 66，布伦瑞克，38106，德国 juan-felipe.gutierrez-gomez@tu-braunschweig.de[2] 哥伦比亚国立大学工程学院电气与电子工程系，Ave Cra 30 No. 45-3，波哥大，111321，哥伦比亚

arXiv:2601.04190v1 [eess.SY] 7 Jan 2026

摘要。 本文介绍了一种面向物联网的无电池无线通信节点，完全由环境光供电，并能够通过可见光通信接收数据。太阳能电池板兼具能量采集器和光学天线的双重功能，可捕获来自 LED 光源的调制信号。轻量级模拟前端对信号进行滤波和数字化处理，供 8 位低功耗处理器使用；该处理器根据储存的能量水平管理系统的运行状态。主处理器仅在必要时激活，以最大限度地降低能耗。数据接收与能量采集器的开路阶段同步，从而减少干扰并提高信号质量。原型能够可靠地解码频率为 800 Hz 的 32 位可见光通信帧，能耗低于 2。8 mJ，且睡眠模式功耗保持在 $30\,\mu$W 以下。

关键词： 无电池、可见光通信、能量采集

1 引言

在现代物联网系统中，低功耗嵌入式设备对于实现长期自主运行至关重要，尤其是在无法频繁维护或难以获得可靠电源的环境中。一项显著进展是无电池传感节点的开发，它们通过采集环境能量（例如太阳能、射频能量或机械振动）来为传感和通信任务供电 [5]。能量采集器不仅能以最低输入功率启动冷启动过程，还能调节电压并管理能量存储，从而确保设备在能量间歇可用的情况下稳定运行。

能量受限嵌入式系统面临的主要障碍之一，是如何在不显著增加能耗的情况下接收数据。传统射频接收器通常需要复杂的模拟前端和高频时钟，导致待机和工作功耗显著增加 [3]。相比之下，可见光通信（VLC）提供了一种低功耗

©2025 作者与 Springer。此版本为作者稿件版本，仅供个人使用。请勿再分发。最终正式版本发表于《ApplePies 2025 会议论文集》。

替代方案，使用简单的光电二极管和低复杂度数字电路进行接收 [6]。此外，太阳能电池板既可用作能量采集器，也可用作接收器，从而减少额外的硬件和功率开销。然而，可见光通信接收的全部潜力仍未得到充分利用。借助可靠的基于可见光通信的数据接收，嵌入式设备可以执行远程重配置、固件更新等操作，而无需依赖耗能较高的无线电。这些特性对于偏远地区免维护的物联网部署尤其有用。

关于无电池物联网设备的研究不多，MiroCard 和 DPP3E 是其中值得关注的实例。由于使用了两个 47 µF 电容器，MiroCard 的活动时段仅有几毫秒；它通过一根 2.4GHz 倒F天线与蓝牙低功耗、Zigbee、6LoWPAN 和 RF4CE 通信。DPP3E 使用可配置的超级电容器来提高能量自主性，采用搭载蓝牙低功耗功能的 Apollo3 Blue Plus微控制器和 AMCA31芯片天线，同时还配备 STM32L433 和 Semtech SX1262 LoRa收发器，以实现远距离通信 [4, 1]。另一项近期研究介绍了由室内光能采集供电的无电池传感器节点，采用蓝牙低功耗或可见光通信/红外组合通信。与蓝牙低功耗相比，可见光通信/红外方案的能耗更高，但数据保留准确率也更高 [2]。为增强适应性，我们提出一种混合架构：通过蓝牙低功耗进行频繁更新，并利用可见光通信实现可靠、节能的下行控制，从而兼顾响应速度与效率。

本文介绍了一种完全由太阳能电池板能量采集器供电的无电池蓝牙低功耗节点。通过太阳能电池板接收的可见光通信信号由一颗低功耗 8 位处理器经通用输入输出引脚检测，该处理器监测信道活动并选择性地唤醒主处理器。主处理器根据不同的信道状况，运行蓝牙低功耗或可见光通信解码应用。我们使用德州仪器CC1352P1 LaunchPad 和 Zephyr实时操作系统实现的原型，成功展示了在 800 Hz 光学时钟下可靠接收和解码 32 位可见光通信帧的能力。可见光通信数据在能量采集器的开路状态下接收，从而最大限度地减少干扰，提升信号质量。

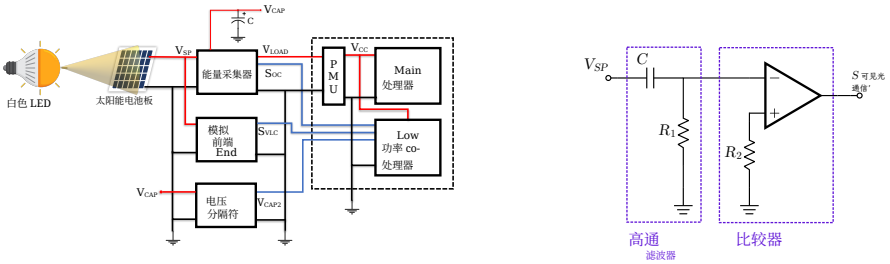
2 系统设计与实现

2.1 系统设计

所提出的系统由一个可见光通信发射器和一个用于能量采集与室内通信的无电池可见光通信-蓝牙低功耗接收节点组成。图 1a 展示了所提出系统的框图。该图说明了系统的整体架构，包括带储能元件的能量采集器、模拟前端，以及由主处理器和专用低功耗协处理器组成的微控制器平台。发射器采用基于荧光粉的白色 LED，在维持标准室内照明条件的同时，以高于 800 Hz 的频率进行可见光通信传输。

VLC 帧的检测与能量采集器的开路阶段协调进行。该时序可降低感测信道上的开关噪声，

从而能够更准确地采样接收到的光信号。VLC 帧包含两部分：前导码和 24 位有效载荷。前导码是一个固定的 8 位指示符。在能量采集器持续 82 ms 的开路阶段，系统能够以 800 Hz 的光时钟速率接收完整的数据帧。VLC 帧内部的另一部分用于感测信道，可检测是否存在 VLC 传输，使协处理器能够触发向微控制器发送的警报中断，并决定运行主应用程序还是启动可见光通信解码。



(a) 无电池可见光通信的组件　　(b) 模拟前端电路

图 1：无电池VLC节点架构与模拟前端设计

无电池节点采用常规太阳能电池板，其尺寸经过设计，便于装置放入口袋携带。模拟前端旨在滤除太阳能电池板电压中的直流分量，并对信号进行调理，使其处于适合微控制器检测的范围内。图 1b 展示了模拟前端电路，其中包括一个截止频率约为 215Hz 的高通滤波器。能量采集器将太阳能电池板收集的能量高效储存在电容器中，并提供稳定的输出电压为微控制器供电。在此设计中，系统会监测电容器电压，确保仅在能量充足时才运行主应用程序或VLC应用程序，从而避免能耗过高导致微控制器关机。分压器将电容器电压缩放至与微控制器ADC输入端兼容的范围。

微控制器内部使用了两个处理器：一个用于持续监测的低功耗协处理器，以及一个用于执行应用程序的主处理器。低功耗协处理器由能量采集器芯片发出的开路指示信号激活，以采样电容器电压。如果电容器电压足够高，低功耗处理器便会在能量采集器的开路采样窗口期间，对模拟前端的数字输出信号进行采样。根据采样数据，它决定运行主应用程序还是VLC应用程序，然后相应地唤醒主处理器。主处理器运行主应用程序（发送广播蓝牙低功耗数据包）

，或者运行VLC应用程序（对可见光通信帧中的信息进行解码，然后根据接收到的数据发送蓝牙低功耗数据包），从而构成一个VLC-BLE回声节点。

2.2 实现

VLC-BLE 节点的硬件结构基于 Texas Instruments LaunchPad CC1352P1 开发板实现，该开发板包含专用的低功耗 8位协处理器，经过优化，可降低功耗并高效运行外设，且能够独立于主处理器运行。能量采集模块采用具备最大功率点跟踪（MPPT）功能的 e-Peas AEM10941 芯片实现。该能量采集芯片在面板处于开路状态时会产生指示信号。此开路指示信号通过 GPIO引脚上的中断激活低功耗处理器。

能量采集器经过配置，可提供稳定的 2.5 V 输出电压。当电容器电压超过 3.67 V 时，启用该输出电压；当电容器电压低于 2.8 V 时，则禁用该输出。电容器的最高电压设为 4.5 V。使用了一个 470μF 电容器作为储能元件。模拟前端采用低电流运算放大器 MAX4007 实现，以确保功耗最低。软件方面，采用Zephyr实时操作系统处理高层应用任务，包括可见光通信解码、蓝牙低功耗通信、协处理器初始化和电源管理状态。

3 结果

我们使用图2所示的实验装置验证了所提出系统的有效性。该图展示了系统的主要组件：用于可见光通信传输的光源、太阳能电池板、带有储能元件的能量采集器评估套件，以及评估板上的微控制器。图中还展示了一台作为蓝牙低功耗接收器的平板电脑，用于显示 TI LaunchPad 发送的蓝牙低功耗数据包。图3给出了微控制器随时间变化的功耗曲线，展示了不同的运行状态。关断状态对应微控制器供电电压为零的情况。供电电压启用后，便进入初始化状态，其中包括微控制器启动，以及负责初始化低功耗协处理器的主线程执行。

随后，微控制器进入休眠状态，等待电容器电压超过过充阈值。当这一条件满足且能量采集器触发开路信号时，系统将切换至蓝牙低功耗或可见光通信+蓝牙低功耗状态。这两种状态均包括在协处理器上执行决策算法、唤醒主处理器以及执行相应的应用代码。连续两次蓝牙低功耗或可见光通信+蓝牙低功耗操作之间的最短间隔为 5 s，这是能量采集芯片的固定参数。在此间隔内，微控制器保持休眠状态，以便

表 1：各系统状态的能量、功耗和执行时间特性。此处， E_{avg}、 P_{avg}和 t_{avg} 分别表示平均能量、功率和执行时间，而 E_{std}、 P_{std}和 t_{std} 表示它们相应的标准差。

状态	E_{avg} [毫焦耳]	E_{std} [毫焦]	P_{avg} [毫瓦]	P_{std} [毫瓦]	t_{avg} [秒]	t_{std} [秒]
INIT	0.345	0.033	3.756	0.295	0.091	0.002
休眠	0.151	0.024	0.030	0.004	5.017	0.842
BLE	0.314	0.001	2.986	0.012	0.105	0
可见光通信+蓝牙低功耗	0.345	0.002	2.925	0.011	0.118	0

储能电容重新充电，并在下一次事件发生前再次达到过充阈值。

测量了每种状态下的功率、能耗和执行时间，结果汇总于表 1。根据这一表征结果，无电池节点在休眠状态下的功耗低于 0.030 mW，足够低，因此电容器可在 5 s 内完成充电。根据能量采集器的阈值配置，完成初始化状态所需的能量估计为 0.345 ± 0.033mJ，该能量足够低，能够确保电压电源激活后系统立即可靠地执行此状态，同时不会使电容器放电至导致电源关断的阈值以下。同样，蓝牙低功耗状态和 VLC+蓝牙低功耗状态所需的能量也足够低，可以在不因能量不足而触发关机的情况下完成执行。总体而言，系统在所有运行状态下都表现出较低的变化性，这一点从能量、功率和时序方面较小的标准差中可以得到证明。在蓝牙低功耗状态和 VLC+蓝牙低功耗状态下，这一点尤为明显：功率和能量变化极小，表明无线传输期间具有可靠的行为表现。

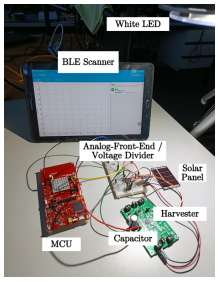


图2:装置实验 用于展示可见光通信-蓝牙低功耗应用的有效性能。

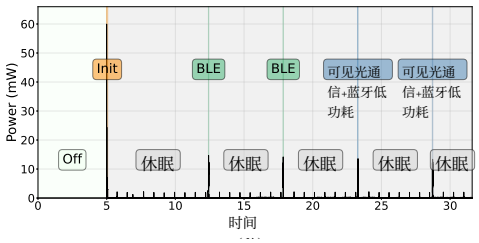


图3:系统各阶段的功耗曲线，包括关闭、初始化、蓝牙低功耗、可见光通信+蓝牙低功耗和休眠状态。

4 结论

在本文中，我们展示了一种无电池系统原型的实现，该原型使用可见光通信从光源接收信息，同时采集光能为微控制器供电。通过利用能量采集芯片用于采样太阳能电池板电压的开路阶段，系统能够以较低的干扰捕获并解码可见光通信信号，从而简化解码过程。该原型能够以 800 比特每秒的传输速率，每 5 s 可靠地接收一个 32 位可见光通信帧。无电池物联网节点的软硬件架构经过设计，可确保较低的功耗，使睡眠状态功耗保持在 $30\,\mu$W 以下。基于协处理器中实现的感知过程，系统能够自主决定运行低功耗蓝牙应用还是 VLC+低功耗蓝牙应用。作为未来工作，提高可见光通信模拟前端中所用运算放大器的压摆率被确定为高优先级改进方向，以支持更高的数据速率。此外，探索使用可见光通信对无电池设备进行固件更新，也是本文提出的一项颇具前景的扩展方向。

参考文献

1. Gomez, A.：按需通信与无电池 MiroCard：演示摘要。载于：第 18 届嵌入式网络传感器系统大会论文集（SenSys '20 3430440 2 629 630 2020 10 1145 3384419）。第 – 页（）。https://doi.org/ 。/。Landivar, J.F., Botirov, K., Sallouha, H., Katz, M., Pollin, S.：用于可靠环境感知的无电池蓝牙低功耗与光能物联网传感器节点。载于：2024 年电气电子工程师学会第 35 届个人、室内和移动无线电通信国际研讨会（PIMRC）。第 1 10817258 3 6 页（2024 10 1109 59610 2024 –）。https://doi.org/ 。/PIMRC 。 。Liu, W., Zhou, X., Durrani, S., Popovski, P.：结合实用调制与射频能量采集灵敏度的无线信息与能量同步传输。载于：2016 年电气电子工程师学会国际通信大会（ICC）。第 1 7511404 4 7 页（2016 10 1109 2016 –）。https://doi.org/ 。/ICC. 。Rufer, L., Stricker, N., Forno, R.D., Thiele, L., Gomez, A.：演示摘要：DPP3E：一种基于能量采集的双处理器平台，用于先进的室内环境感知。载于：2022 年第 21 届 ACM/电气电子工程师学会传感器网络信息处理国际会议（IPSN）论文集。第 495–496 页（2022）。https://doi.org/10 00048 5 1109 54338 2022 。/IPSN 。 。Sanislav, T., Mois, G.D., Zeadally, S., Folea, S.C.：物联网能量采集技术。IEEE Access **9**，39530–39549（2021）。https://doi.org/10 3064066 6 1109 2021 。/ACCESS. 。Xu, X., Shen, Y., Yang, J., Xu, C., Shen, G., Chen, G., Ni, Y.：PassiveVLC：为无电池物联网应用实现实用的可见光反向散射通信。载于：第 23 届 ACM 移动计算与网络年度国际会议论文集（MobiCom '17）。第 180–192 页（2017）。https://doi.org/10.1145/3117811.3117843