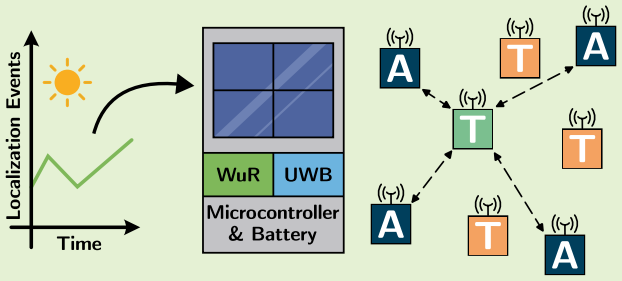
本研究已被 IEEE 传感器期刊接收发表。DOI：10.1109/JSEN.2026.3652283

Eco-WakeLoc：一种能量中和的协作式超宽带实时定位系统

Silvano Cortesi，*IEEE* 研究生会员，Lukas Schulthess，*IEEE*研究生会员，Davide Plozza，*IEEE* 研究生会员，Christian Vogt，*IEEE* 会员，以及 Michele Magno，*IEEE* 高级会员

摘要—室内定位系统面临能效与响应速度之间的根本性权衡，这对于在 GPS拒止环境中运行的移动机器人等新兴应用场景尤为重要。传统实时定位系统（RTLS）要么需要持续供电的基础设施，从而限制其可扩展性；要么响应速度受限。本文介绍了 Eco-WakeLoc，该系统结合超低功耗唤醒接收器（WuRs）与太阳能采集，旨在实现厘米级超宽带（UWB）定位，同时保持能量中和。通过仅在需要时激活锚节点，所提出的系统消除了持续能耗，同时实现厘米级定位精度。



为降低协调开销并提升可扩展性，Eco-WakeLoc采用协作定位机制：主动标签发起测距交换，而被动 标签则机会性地复用这些消息，通过到达时间差（TDOA）进行定位。基于加性增/乘性减（AIMD）的能量感知调度器会根据采集能量调整定位频率，从而在确保长期能量中性的同时，最大限度地提升传感器网络的整体性能。

全面评估结果表明，使用Levenberg-Marquardt三边定位的主动 标签可实现厘米级精度，其三维空间平均误差为21.89 厘米；通过协作TDOA定位的被动 标签平均误差为25.70 厘米。实测能耗仅为：主动 标签每次定位3.22 mJ，被动 标签951 μJ，锚点353 μJ。在一台配备九个锚点的四足机器人上进行的真实环境部署证实了该系统的实用性，在动态室内环境中实现了43 厘米的平均精度。从空电池开始进行的为期一年的仿真，采用典型室内照明条件下由10 cm^2 电池片采集的太阳能，结果显示，标签每天平均可完成2031次定位，一年后电池容量仍超过7 %——这表明该实时定位系统能够持续实现能量中性运行。

Eco-WakeLoc 表明，无需基础设施持续运行，也能大规模实现高精度室内定位。它结合了能量中和、协作定位和自适应调度，从而支持免维护部署，适用于大规模物联网应用。

索引词—异步、节能、能量采集、事件驱动、室内定位、物联网（IoT）、按需、实时定位系统（RTLS）、自持运行、超宽带（UWB）、唤醒无线电（WuR）。

arXiv:2601.03171v1 [cs.NI] 6 Jan 2026

I. 引言

室内定位正成为众多应用的基石，涵盖智能建筑 [1]、资产追踪 [2]、机器人技术 [3] 以及普及式物联网（IoT）服务 [4]。总体而言，这些应用需要精准、按需且可扩展的位置跟踪，同时要求被定位对象（即标签）以及基础设施（即锚点）能够长期运行，甚至实现自持运行 [4], [5]。为实现这些目标，定位技术、超低功耗硬件、高效定位算法和节能定位调度必须结合起来，才能为实时定位系统（RTLS） [2], [6], [7]构建可靠的传感系统。

关于定位技术，在众多用于室内定位的无线技术中，超宽带（UWB）凭借厘米级定位能力 [8]–[10] 以及出色的抗干扰能力 [11], [12]，已成为首选技术之一。典型的基于 UWB 的实时定位系统由位置已知的静态锚点和移动标签组成，并使用到达时间差（TDOA）或多边定位等技术估计移动标签的位置 [13], [14]。

如此庞大的基础设施要求锚点通过有线方式供电 [13], [14]，这阻碍了可扩展性，也妨碍了对现有建筑进行经济高效的改造 [15]。正如低功耗蓝牙（BLE）在商业应用中已经证明的那样，

(通讯作者：*SilvanoCortesi*)Silvano Cortesi、Lukas Schulthess、Davide Plozza、Christian Vogt 和 Michele Magno 均供职于瑞士苏黎世 ETH 项目式学习中心，邮编 8092（电子邮箱：first-name.lastname@pbl.ee.ethz.ch）

©2026年 IEEE。允许个人使用本材料。对于任何其他用途，包括在任何当前或未来媒体中转载/再版本材料以用于广告或宣传目的、创作新的合集作品、转售或重新分发至服务器或列表，或在其他作品中重复使用本作品的任何受版权保护部分，均须获得 IEEE 的许可。

基于信标的室内导航在锚点或信标采用电池供电且能够运行数年时，更易于进行改造 [16]。因此，实现超低功耗运行对于精确实时定位系统的广泛采用至关重要，理想情况下还应实现自持运行 [17]，从而降低安装和维护成本。因此，在实现实用化和大规模部署方面，一个关键的研究挑战在于降低整个实时定位系统的功耗，同时保持较高的定位性能 [15], [18]。

然而，用于定位的传统无线电（包括超宽带）在空闲监听期间效率极低，因为收发器在等待可能到来的数据包时所消耗的功率几乎与主动通信时相同 [19], [20]。这种持续的能量消耗成为电池供电移动系统的一大瓶颈。为解决这一问题，超低功耗唤醒无线电（唤醒接收器） [21], [22], 与新兴的能量感知算法相结合，实现了事件驱动通信：设备保持深度睡眠状态，仅消耗微瓦级功率，并且仅在收到专用唤醒信号后才启动主收发器 [23]。

这种方法避免了传统实时定位系统解决方案在能效与响应能力之间的根本性权衡：占空比循环或定时通信方案可以显著降低功耗 [24],[25], ，但必然会增加延迟，从而限制其在时间关键型和事件驱动型应用中的使用 [6]。此外，时间调度方法并未考虑实际的定位需求：当没有资产需要跟踪时，锚点仍会定期启动以确保定位，导致不必要的能耗 [26]。相反，持续处于活动状态的设备能够实现低延迟定位；然而，由于能耗增加，其电池寿命会大幅缩短。

虽然唤醒接收器硬件能够为按需运行奠定基础，但只有加入智能且具备能量感知能力的算法，系统才能有策略地管理其资源，从而维持长期能量中和 [27],[28]。先前的研究表明，将超宽带与唤醒接收器相结合，通过以事件驱动的方式运行高能耗的超宽带距离感测，可实现准确且节能的定位，这一方案具有理论上的优势。WAKE- LOC [26],对此进行了研究，并在第 III-B 节中作为背景详细介绍。具体而言，WAKELOC 专注于定位协议，而 ECOTRACK [29]则解决了能量感知调度问题。通过根据采集能量动态调整感测和通信速率，ECOTRACK 确保设备在能量采集部署中保持能量中和，同时尽可能多地提供全球导航卫星系统（GNSS）定位，从而兼顾性能与电池寿命。

本研究提出了一种协作式能量中和实时定位系统，将超低功耗唤醒接收器与 UWB测距相结合，解决了一个尚待攻克的难题：尽管 UWB 本身能耗很高，如何实现可持续的高精度定位。与我们早期的研究不同，WAKELOC 专注于定位协议，ECOTRACK 则开发了自适应能量感知调度；本方法将这两项成果结合起来，为要求更高的基于UWB的定位场景提供统一解决方案。通过将超低功耗唤醒信令与高精度 UWB测距相结合，标签和锚点在明确触发前始终处于深度睡眠状态，同时仍能实现厘米级定位精度，并按需通信。该系统基于一种新开发的传感器节点，该节点集成了 WAKEMOD [30]、QORVO 的 DWM3000 UWB收发器以及太阳能采集功能。

此外，我们开发了一套完整的实现平台，不仅通过硬件实现了所提出的系统，还为其实验验证通信原语和算法智能奠定了基础。该平台是可持续定位的概念验证，连接了理论设计与现实可行性。加入室内太阳能采集进一步拓展了这一理念，使系统能够在真实的光照条件下持续运行，从而减少维护需求，并支持可扩展的长期部署。本工作的主要贡献如下：

1) 我们提出并评估了一种能量感知调度策略，旨在根据能源可用性动态安排测距机会，从而最大限度地提高活跃标签的定位率。2) 全面表征了系统在多种定位求解器和环境下的精度，指出了与真实环境部署相关的性能权衡。3) 为展示系统功能，我们开发了一款开源[1]超低功耗传感器节点，集成了 WAKEMOD、DWM3000 UWB收发器和太阳能采集模块。对其功耗和计算成本进行的详细评估，验证了通过自持运行实现事件驱动高精度定位的可行性。4) 我们在真实环境中部署了系统，使用四足机器人作为移动标签，并设置九个锚点，展示了该系统在动态室内环境中的实用性，其定位延迟低于 83 毫秒；此外，我们还提供了一个开源仿真框架[1] ，用于展示大规模部署的影响。

II. 相关工作

开发能量中和室内定位系统需要应对多个领域的挑战。以下讨论涵盖基于UWB的定位方法及其可扩展性限制、支持超低功耗运行的WuR技术，以及定位算法及其计算权衡。

A. 基于超宽带的室内定位系统

大多数三维定位方案都基于超宽带能够以厘米级精度准确测量距离的能力 [31], [32]。目前已有多种利用

[1]https://github.com/ETH-PBL/WakeLoc

这些测量结果的方法，本节将对此进行概述。

传统双向测距（TWR）方法需要锚点持续运行，才能维持低延迟的定位功能 [26]。每个标签都必须与至少四个锚点交换多条消息；当多个标签尝试同时定位时，这会显著限制系统的可扩展性 [33], [34]。近期的解决方案通过调度算法 [35], 、锚点选择策略 [36], 和并发传输技术 [37], [38] 来应对这一问题。尽管这些方法提高了可扩展性，但锚点持续运行带来的根本能耗问题仍未解决。

基于到达时间差的系统通过同步锚点传输，使多个标签能够同时定位，从而提供更好的可扩展性 [13], [39]。下行到达时间差（DL-TDOA）方法支持标签数量无限扩展，因为数据包开销及由此产生的非线性方程组复杂度仅取决于锚点数量 [40], [41]。然而，这些系统需要复杂的同步基础设施以及锚点之间的协调，这限制了实际部署的灵活性，并带来了与锚点数量相关的可扩展性问题。

近期的混合方法尝试结合这两种范式的优点。一些系统结合双向测距和到达时间差，以实现更高的精度 [42], 或便于锚点同步 [34], ；另一些系统则采用协作定位，让标签共享信息以提升整体精度 [14]。然而，这些方法仍依赖持续供电的基础设施，因此无法实现真正的能量中性运行。

此外，Zhang等人 [43] 研究了基于超宽带的多智能体系统协作定位，尤其是无人机（UAV）集群的定位，并发布了一个数据集，其中包含节点之间的所有距离测量。他们展示了协作定位方法：多个移动节点利用与固定锚点之间以及彼此之间的测距测量，在各种飞行编队下实现了室内环境中低于1米、室外环境中低于2米的定位精度。该方法采用双边双向测距（DS-TWR），无需外部同步基础设施即可实现基于距离的协同导航，但随着节点数量增加，通信开销也会随之增大。虽然这项技术提升了鲁棒性，但仍要求节点持续运行，也未解决长期能量可持续性问题。

在本研究中，我们采用了 [37], 提出的并发传输原理，但方式更为宽松。正如 WAKELOC [26],所示，我们的方法允许按顺序接收，同时只需传输一条消息，从而兼顾可扩展性和能效。此外，WAKELOC 的无源标签还会伺机利用同一条消息进行到达时间差测量 [13]。

综合比较功耗与定位质量可知，超宽带收发器在主动监听期间的功耗超过 100 mW [19], [20], ，这使电池供电部署面临挑战。占空比循环通过引入延迟来缓解这一问题，并因此限制了定位的响应速度 [24], [25]。WAKELOC [26] 表明，将唤醒无线电与超宽带集成后，即可实现事件驱动定位，且精度与 [13], [31],相近，但该研究并未解决长期能量中和问题。

B. 低功耗物联网的唤醒无线电技术

唤醒接收器已成为能量受限物联网系统中实现事件驱动通信的关键技术 [44]。唤醒接收器在保持超低功耗监听能力的同时，让主无线电保持深度睡眠，从而使系统兼具响应能力和能效。

现代唤醒接收器架构的监听功耗范围为 36nW 至 100μW [21], [45], ，比传统无线电接收器低数个数量级。唤醒接收器的灵敏度通常介于 -48dBm 至 -75dBm 之间，在功耗、接收范围和唤醒持续时间之间需要权衡。近期实现已证明，唤醒接收器能够与多种主无线电技术成功集成，包括蓝牙低功耗 [46], 和超宽带 [30]。

一种专用的唤醒接收器集成电路（IC）是弗劳恩霍夫的 FH101RF，用于 WAKEMOD [30]。它是唯一商用的唤醒接收器，支持三频接收（433 MHz、868MHz 和 2.4 GHz），空闲监听功耗为 6.9μW，灵敏度为 -72.6 dBm，同时唤醒延迟低于 55 ms——其性能接近学术界最先进的 IC [21], [47], ，并兼具商用可得性和灵活性。

在我们的工作中，我们利用这些进展，将 WAKEMOD 及其商用唤醒接收器集成到超宽带定位系统中，证明能量中性运行不仅在理论上可行，也能通过实用的现成组件实现。

C. 定位算法与计算权衡

根据已知锚点位置选择三维定位算法，会显著影响定位精度和计算能耗，尤其是对于在严格能量预算下运行的资源受限设备。

对于多边定位问题，采用特征值分解的方法可以获得最优解 [48], [49]。这些方法针对给定的距离测量能够实现统计意义上的最小误差，但需要对稀疏矩阵进行特征分解。Larsson 等人在与最先进的求解器进行比较时 [50]–[52], ，在八个数据集上的平均精度最高，误差为 34厘米，而各求解器的平均误差为 70厘米。在运行时间复杂度方面，它比其他求解器的平均水平更高效 $47\times$，且仅比速度最快的求解器慢 16% [51]。

迭代方法，尤其是 Levenberg–Marquardt（LM）算法 [53], [54], ，在降低计算需求的同时提供了一种切实可行的替代方案。虽然不能保证找到最优解，但对于条件良好的定位问题，LM迭代通常能够快速收敛，并且可在内存使用有限的情况下实现。解决方案质量与

计算成本之间的权衡，使迭代方法成为能量受限系统的有吸引力的选择。

除了上述方法外，由于约束方程具有双曲线特性，TDOA定位还面临额外的算法挑战 [40], [41]。对于特定几何配置，存在闭式解；但在一般情况下，则需要使用迭代式或基于粒子滤波的非线性最小二乘求解器 [41]。

我们针对平台有限的能量和计算资源，对TDOA和多边定位求解器进行了定制，以应对这些挑战，从而在保证可行性的同时实现可扩展的协作定位。

III. 系统架构与特性分析

本节介绍的定位系统由锚点和标签（如图1所示）、基于唤醒接收器的定位协议（由需要定位的标签进行在线处理），以及能量感知定位调度算法组成。

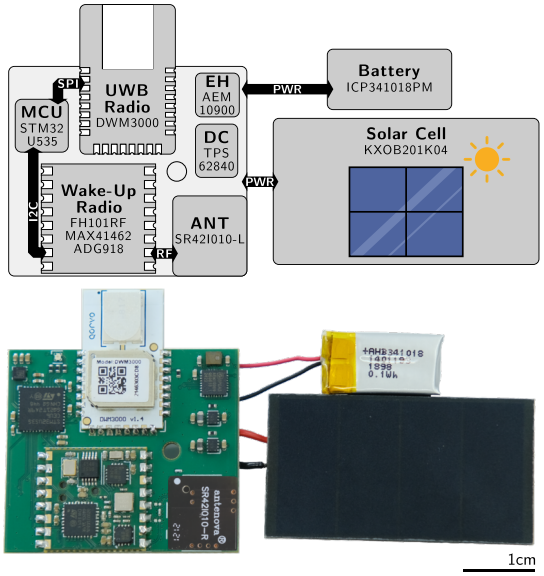


图1. 用于锚点和标签的已开发传感器节点概览。

A. 硬件设计

该硬件架构以太阳能电池进行能量采集，并搭配小型锂聚合物电池缓冲，确保自主运行。系统将用于定位的超宽带收发器与可高效进行空闲监听的 WAKEMOD唤醒接收器相结合，并由低功耗微控制器 (MCU) 统一管理。

能量采集功能基于集成最大功率点跟踪（MPPT）的 E- PEAS AEM10900 升压转换器。采用尺寸为 23 mm $\times$42mm 的 ANYSOLAR KXOB201K04TF 太阳能电池作为能量来源。所选电池的开路电压接近能量采集器的最大输入电压，此时其效率最高。使用一块 35 mAh 锂聚合物电池，在低光照条件下储存能量。

节点本身的 1.8V 电源由德州仪器的高效率、静态电流为 60nA 的 TPS62840 降压转换器生成。

意法半导体 STM32U535CEUX 微控制器基于 ARM CORTEX-M33，配备浮点单元 (FPU)，运行频率最高可达 160 MHz，并配有 512 kB 闪存和 274 kB 静态随机存取存储器。其功耗为 16.3 µA MHz，并可在关断模式下达到 90 nA 的低功耗状态。

定位由 QORVO DWM3000 超宽带模块实现，其深度睡眠时的功耗约为 230 nA。使用 [55] 的超宽带收发器配置经过优化，可实现较远的通信距离（5号信道），同时保持较低的发射功耗（128 位前导码）。

最后一个组成模块是唤醒无线电模块 WAKE-MOD [30]。该开源模块采用 FRAUNHOFER FH101RF 唤醒无线电和 ANALOG DE- VICES MAX41462 移幅键控（ASK）发射器，两者均通过 ANALOG DEVICES ADG918 射频（RF）开关连接至同一天线。该模块针对 868 MHz 设计，接收灵敏度为–72.6 dBm，在 1.8 V 电压下的发射功率最高可达 2.78dBm。系统在主动监听时的功耗仅为 6.9 µW，因此始终保持深度睡眠状态，仅在收到唤醒呼叫（WuC）时才会唤醒。

B. 定位协议与算法

采用的定位方法基于 WAKE- LOC [26]。标签可以通过<风格 id='2'>主动发起定位过程来获取自身位置（主动 模式），也可以通过<风格 id='6'>被动重用其他标签定位过程中交换的消息来获取位置（被动 模式），从而使实时定位系统中的标签数量具有可扩展性。图 2 展示了该方案的概览。

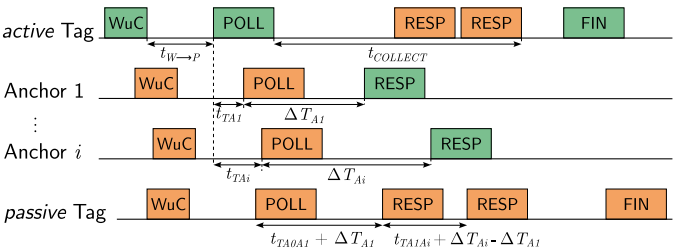


图 2. [26], 所示的 WAKELOC 定位方案结合了双向测距与到达时间差。绿色消息表示发送，橙色表示接收。

在主动模式下，标签首先通过唤醒呼叫唤醒附近的锚点，然后基于嵌套式载波频偏校正单边双向测距（CC-SS-TWR）交换执行多边定位。与简单方案相比，对于使用 N_A 个锚点进行定位，这种嵌套方案所需的消息数量减少至N_A+1。标签根据收集到的距离测量计算自身位置，最后广播其估计值。

每个锚点的响应延迟 ΔT_{Ai} 取决于其索引，使用 $\Delta T_{Ai} = \Delta T_{fix} + \Delta T \cdot \left[(i-1) \bmod \hat{}N_A\right]$ 来

ˆ确保可扩展性。 N_A 的取值应确保接收范围内没有两个锚点同时响应，因此锚点的布置需要保持一定的空间间隔。

在被动模式下，标签会复用由主动标签触发的定位交换。收到初始唤醒呼叫后，它会监听附近锚点的轮询与响应消息，并应用到达时间差来确定自身位置。缺失的信息，即主动 标签的位置，则从主动标签的最终广播中获取。

通过结合双向测距和下行到达时间差，WAKELOC 实现了锚点和标签数量上的可扩展性，其低延迟仅取决于唤醒接收器，并且锚点在主动监听时仍可保持超低功耗。然而，执行主动定位的标签比标准双向测距系统消耗更多能量，因为它还需要发送唤醒呼叫并广播自身位置。

在定位过程中，充当主动 角色的标签必须通过多边定位完成定位，而充当被动 角色的标签则应用到达时间差。Larsson 等人 [48] 证明，多边定位问题可以转化为特征值问题，从而实现最优求解（如果能够精确求得特征值），并利用现有测量达到统计意义上的最小误差。除 Larsson 的方法外，还评估了迭代（尽管非最优）求解器中的 LM 迭代 [53], [54]。

标签的 TDOA 问题同样是一个非线性最小二乘问题，也使用 LM迭代求解。本研究中实现的不同求解器已作为开源库发布在 GITHUB[2] 上。

C. 能量感知 *AIMD* 算法

能量感知协同算法以 ECOTRACK [29] 为基础。该算法的核心原则是根据可用的采集能量动态调整活跃定位的数量，并以电池荷电状态作为能量收入的替代指标。该方法遵循加性增/乘性减（AIMD）范式，这一范式在计算机网络的拥塞控制中广为人知。只要能量充足，算法就会将每小时定位率线性增加 1；一旦电池状态表明能量不足，便将定位率减半（乘法递减因子为 2）。这些状态之间的转换由有限状态机（FSM）结合度量函数控制。

1）有限状态机（FSM）：ECOTRACK 的有限状态机如图3所示，它以变量 k为依据，该变量定义为每小时活跃定位次数（即运行此有限状态机的标签的每小时活跃定位次数）：它可以保持 k不变、将 k 加一，或将 k减半。

通过评估 ECOTRACK 的度量函数 m 与两个阈值 β_1 和 β_2，触发状态转换；这两个阈值决定标签应提高还是降低当前定位率。此外，电池电量阈值γ 确保荷电状态足够高时，算法始终提高 k ，

[2]https://github.com/ETH-PBL/WakeLoc-Algorithm

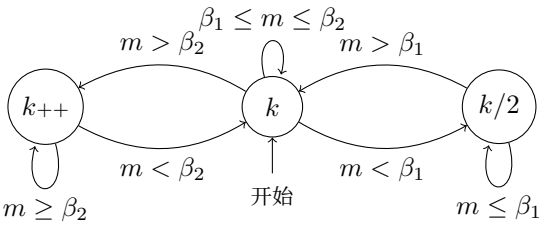


图3。基于有限状态机的自适应采样算法的状态图：$k/2$ 表示 k 在下一步减半； $k++$ 表示 k 在下一步按固定速率增加，在本例中增加一； k 表示 k 在下一步保持不变。

荷电状态。 β_1， β_2 和 γ 共同构成有限状态机的可调参数。

2）度量函数：ECOTRACK 的度量函数 m 定义见公式（1）。它评估相邻两小时之间电池状态$b[t]$ 的变化，并按电池容量 B进行归一化。电池状态较高或上升时，度量指标会得到奖励；电池状态较低或下降时，则会受到惩罚。具体而言，当电池电量保持在边界 γ以上时，算法始终会提高定位率；而电池状态下降则会触发对 k的乘法递减。这一机制使系统能够平稳适应波动的能源可用性，在最大限度增加活跃定位次数的同时，保持长期可持续性。

$$m = \underbrace{B \cdot (b[t] - b[t-1])}_{\text{batt. state difference}} - \underbrace{\left(\frac{1}{b[t]} - 1\right)}_{\text{low batt. penalty}} + \underbrace{\begin{cases}\infty, & \text{if } b[t] \ge \gamma \\ 0, & \text{otherwise}\end{cases}}_{\text{high batt. reward}} \tag{1}$$

此度量指标的第二个版本（式（2））对每天的活跃定位数量设定了上限（系统约束，未经调优），达到此上限后便会限制其速率。

$$m_{bounded} = \underbrace{\begin{cases} m, & \text{if } k < k_{max} \\ \min\left(m, \ \frac{\beta_1+\beta_2}{2}\right), & \text{otherwise}\end{cases}}_{\text{bound on max. localizations}} \tag{2}$$

3) 算法调优：参数 β_1， β_2 和 γ 通过离线全局调优，以在满足式（3）约束的前提下优化性能。对于每个标签 j，年末的电池状态必须至少为 10%。调优期间，所有电池均初始化为 10% 荷电状态（SoC），以模拟保守的初始状态。

$$\begin{aligned} b_j[T] &\ge 10\,\% \ \forall j \\ b_j[\cdot] &\le 100\,\% \ \forall j \end{aligned} \tag{3}$$

式（4）中的优化问题旨在最大化一年内所有标签的主动和被动定位次数的平均值。令 $l_j[t] \in \mathbb{N}$ 表示标签 j 在第 t天的定位次数。那么，

$$J = \max_{\{l_n[t]\}} \left(\frac{1}{N_T} \sum_{j=1}^{N_T} \sum_{t=1}^{T} l_j[t] \right) \quad \text{subj. to Eq. (3)} \tag{4}$$

其中， N_T 为标签数量， T 为一年中的天数。

随后，每个标签每小时以均匀随机的方式安排下一小时的主动定位，从而提高时间覆盖率。此外，该算法仅调节主动 定位决策。在仿真中，被动定位始终在有能量可用时 opportunistically 执行，使标签能够利用正在进行的通信交换，并使该算法天然具有协作性。

IV. 实验设置

为验证系统的性能和精度，我们针对四个核心方面开展了多项评估：不同求解器下的定位精度、超低功耗传感器节点的性能与功耗，以及系统在受控和真实环境部署中的表现，其中包括四足机器人评估和大规模仿真。以下各小节将详细介绍每项实验设置。

A. 定位精度

为了评估用于定位的不同算法求解器（第 III-B 节所述的多边定位 Larsson 和 LM迭代，以及用于到达时间差的 LM迭代），我们在一间尺寸为 8.6m × 7.6 m 的房间内进行了实验。实验采用 BOSCH GLM150-27C 激光测距仪和 VICON 动作捕捉系统提供真实值。

为尽量减小几何精度因子（GDOP），在给定基础设施上策略性地布置了五个锚点，以实现最佳空间覆盖 [10], [56]（GDOP为0.090）。两个标签分别为一个有源标签和一个无源标签，被放置在一个5 m×5 m网格内的不同高度处。共测试了200种不同的位置组合。具体而言，首先在网格上移动有源标签，同时将无源标签固定在其位置；然后反之操作。每种位置组合约进行了480次不同的测量，共得到包含95 457次测量的数据集。首先对每个锚点进行一次初步测量，用于校准其天线延迟。测量设置如图4所示

在第二次评估中，我们在图7所示的真实场景中对实时定位系统进行了评估。实验设置包括一间面积为5.7 m × 7.0 m的办公室和一条相邻的走廊，走廊面积为3.8 m × 14.7m，总空间为91 m^2。在这一真实应用场景中，标签安装在 UNITREE A1 四足机器人顶部，该机器人配备了 [57] 中所述的传感器背包。一个主动标签和一个被动标签安装在距地面53.4 cm的高度，彼此相距20.7 cm。实验中，机器人从办公室出发并穿过走廊。该设置中共部署了九个锚点和两个标签。机器人搭载的 HOKUYO UTM-30LX-EW 二维激光雷达与自适应蒙特卡洛定位（AMCL）（如 [57] 所述）被用作真实值基准，因为其厘米级精度高于实时定位系统基准测试所需的精度。

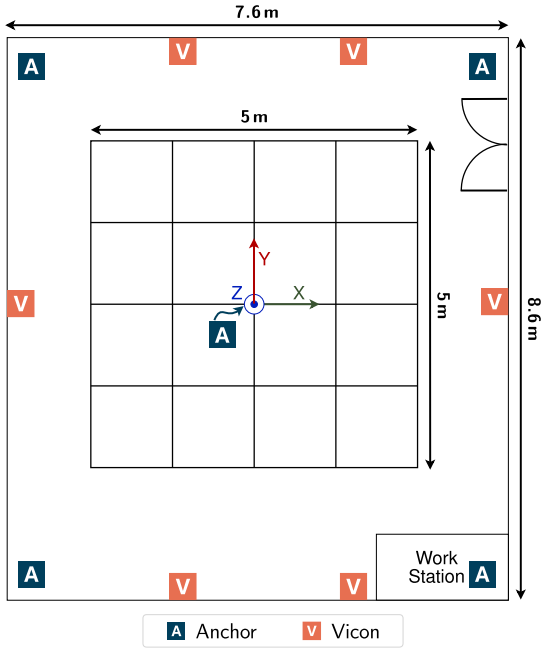


图4。 用于评估定位精度的实验设置。 A 表示锚点， V 表示VICON系统的摄像机。

B. 计算成本

使用第 IV-A 节所述方法采集的记录数据集，对微控制器上的三种微控制器实现（最优/迭代多边定位、迭代 TDOA）进行了评估。此外，评估过程中采用了四种不同的求解器容差（10^{-2}、10^{-4}、 10^{-6} 和 10^{-8}）。对于 LM算法，容差用作相对容差，以便在迭代过程中提前停止；对于 Larsson算法，容差则用于特征向量计算中的逆迭代。通过这种方法，可以定量考察定位统计精度（平均误差、方差）和算法性能（计算时间、资源需求）；这两项指标均在所开发的传感器节点上进行评估。计算时间通过 ARM CORTEX-M33微控制器的 Data Watchpoint and Trace（数据观察点与跟踪，DWT）外设进行测量。

针对LM-TDOA求解器评估了三种场景：*i)*假设已知有源标签的位置（经典TDOA）；*ii)*使用通过Larsson多边测量估计的有源标签位置；以及*iii)* 使用LM多边测量。

C. 功耗

使用配备三个 N6781A 源测量单元的 KEYSIGHT N6705C直流功率分析仪分析节点的功耗。三个节点同时连接到功率分析仪的三个不同通道，其中一个配置为锚点，其余两个分别配置为主动和被动标签。以 48.8 kHz 的采样频率，在 30 秒时间窗口内记录三个节点的功率曲线和多次定位。

D. 能量感知仿真评估

除真实环境部署外，我们还创建了一个仿真框架，用于估计大规模部

署相对于所提出的能量感知定位算法的表现。

从几何结构上看，仿真基于 CLOVES测试平台的 DEPT 环境 [58], ，覆盖面积为 6382m^2 ，由两个较大的开放空间和一条连接它们的狭窄走廊组成。部署包含 89 个锚点位置。此外，我们还对一年内分别随机部署 5、20 和 100 个标签的场景进行了仿真。假设至少收到五个成功的锚点响应，才能成功完成定位。

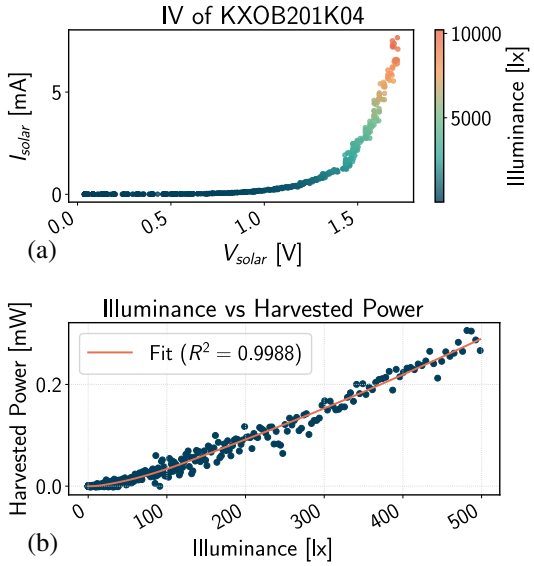


图 5。太阳能电池和能量采集器的特性。(a) 显示 KXOB201K04 太阳能电池的电流-电压曲线，(b) 显示光照强度与采集功率之间的测量关系，该功率被输入至一个3.7V 储能端，并同时给出拟合的多项式函数。

由于没有适用于我们所用能量采集器和太阳能电池的长期数据集，因此采用了 [59] 中介绍的室内太阳能采集数据集。该数据集提供了办公楼内六个不同地点、超过两年的室内太阳能采集测量数据。每个地点均以 1Hz 的频率记录照度。在本次评估中，我们选取了 2018 整年以及其中监测的五个位置。这些地点涵盖了广泛的照明条件，从面向窗户的办公室到几乎没有自然光的走廊。

为使数据集适配我们的传感器节点电子设备，我们首先在太阳能测试平台中对 AEM10900 与 KXOB201K04 太阳能板进行表征，该平台连接了两台 KEYSIGHT B2902A 源测量单元。如图 5 所示，在最大功率点跟踪为 75% 的条件下，我们测量了从 0.2 lx 到 10 klx 共 1000 个照度等级下的关系。

我们对测量数据拟合了三个 Sigmoid混合多项式，分别适用于 0.2 lx–15 lx、15 lx–1500 lx 和 1500 lx–10 klx 区间。由此得到的照度到采集功率模型的 R^2 为 0.9988。利用该模型，我们将 Sigrist等人 [59]数据集中的照度测量值转换为本系统可采集的功率，并将数据降采样为每分钟一个样本。每日可采集能量从昏暗环境中的仅 0.31 ± 0.13J 到明亮环境中的最高 18.51 ± 20.65J 不等；典型室内环境下，每日约为 1.81 ± 1.21J。

基于这些考虑，仿真设置如下：在仿真中，每个锚点和标签均配备了一块容量为 35 mAh 的空电池（充电至 0%），并从数据集中随机分配一个能量采集配置。电池自放电根据 RENATA 用户指南 [60] 进行建模：满容量时漏电电流为 4 µA，荷电状态为 30% 时为 1 µA，中间状态采用线性插值。

在每个仿真步（1 分钟）中，首先，每个节点根据其能量采集配置获得相应的采集能量。随后，按照随机顺序处理标签，以确保其能量感知算法的公平性。对于每个标签，是否启动主动定位的决策采用第三节C中介绍的算法。将这两种策略分别与恒定速率算法进行比较（速率为可调参数）；在恒定速率算法中，每个标签每小时尝试执行固定数量的主动定位。对于基于加性增大乘性减小的算法和恒定速率算法，仅在全年仿真之前，使用平均光照位置 P06 和 P13 对参数进行调优；此外，还在仿真环境中对 100 个随机均匀分布的标签进行了仿真。恒定速率算法要满足公式（3）中的约束，其上限为每小时执行一次主动定位。有界AIMD的上限设置为每小时 6 次定位。

如果标签决定执行主动定位，则会考虑视距（LOS）范围内 20 m 或非视距（NLOS）范围内 5 m 的锚点。每个锚点彼此可达的数量 N_A 设为 10。根据第五节C中介绍的功耗特性表征，相应减少每个锚点的能量。只有锚点的电池在响应后仍未耗尽，该响应才算成功。如果至少有五个锚点成功响应，则认为定位成功；否则，此次尝试视为失败。位于相同锚点覆盖范围内的相邻标签可以在同一时间步执行被动定位。如果观测到超过五个成功的锚点响应，则被动定位成功。最后，相应调整标签的电池状态

表I不同定位类型和所用算法对应的精度结果。数值以厘米为单位。

	WAKELOC 主动(双向测距)		WAKELOC 被动(到达时间差)		
	Larsson	LM	到达时间差与GT	到达时间差与Larsson	带 LM 的到达时间差
avg	21.68 厘米	21.89 厘米	33.05 厘米	25.66 厘米	25.70 厘米
md	16.13 厘米	16.13 厘米	27.49 厘米	19.81 厘米	19.86 厘米
$\sigma(\cdot)$	17.02 厘米	17.13 厘米	24.84 厘米	18.97 厘米	19.05 厘米
min $\|\cdot\|$	0.28 厘米	0.27 厘米	0.35 厘米	0.42 厘米	0.26 厘米
max $\|\cdot\|$	497.72 厘米	345.75 厘米	485.79 厘米	464.38 厘米	469.36 厘米

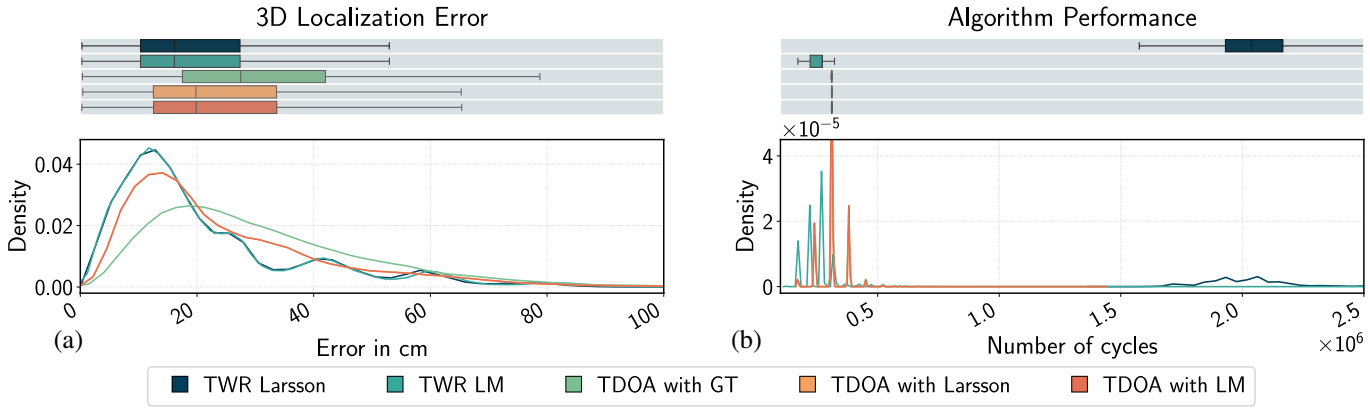


图6. 不同多边定位和到达时间差求解器的定位精度（a）与计算成本（b）。

以反映能耗。

V. 结果

本节基于第四节所述测量所得的结果进行展示并讨论其发现。评估涵盖受控部署和真实场景部署，对系统能力进行了全面验证。以下各小节将详细介绍定位精度、计算性能、功耗特性，以及大规模能量感知与协同行为方面的结果。

A. 定位精度

使用 IV-A 节所述测量数据得到的位置结果，在所有容差下几乎完全相同（变化小于 1 毫米），容差为 10^{-2} 时的结果汇总于表 I，并显示在图 6 中。可以看出，采用LM迭代的多边定位最大误差较低，但其平均误差为21.89 厘米，略高于 Larsson算法（平均误差为 21.68 厘米，中位数为 16.13 厘米）。对于到达时间差求解器，利用多边定位估计的主动标签位置，比依赖发起器的真实值具有更高的定位精度。基于真实值的经典到达时间差方法平均误差为 33.05 厘米，而采用 Larsson算法和 LM迭代得到的多边定位估计值后，精度分别提升至 25.66 厘米和25.70 厘米。这一现象与 [26], 中的观察结果一致，该文将性能提升归因于可用测量数据的增加。

这些结果凸显了两点：首先，Larsson算法的平均表现略优于 LM迭代，这与其理论上能够求得最优解的性质一致。不过，在少数情况下，LM迭代的收敛效果更好，最大误差更小便证明了这一点。Larsson算法出现较大最大误差，是因为它未能在 1000 次幂迭代法迭代（427 毫秒）内收敛，因而无法正确求出最大特征值。在病态场景下，通过迭代求解特征值时可能出现收敛失败，尤其是在传感器几何布局不理想或测量噪声较大时 [61], [62]。其次，使用任一种多边定位方法得到的到达时间差结果差异都可以忽略；图 6 也显示，“采用 LM 的到达时间差”和“采用 Larsson 的到达时间差”两条曲线几乎完全重合。

在四足机器人上进行的真实场景评估（见图7和表II）显示，结果略差。一方面，锚点的位置布局并非GDOP最优；另一方面，在位置确定时也将没有直接视距的锚点纳入了考量，尽管后续可以利用UWB消息的信道脉冲响应（CIR）将这些锚点排除。定位算法会将带叉号的位置估计值识别为因未收敛或可用锚点数量不足（< 4）所致，并将其归类为离群值。

主动 标签的结果继续表明，Larsson算法和LM迭代的精度相当，平均偏差为43厘米（两者均未计入被识别为离群值的估计值）。值得注意的是，

表II四足机器人激光探测与测距（激光雷达）精度真实场景评估。数值单位为米。

	WAKELOC 主动（双向测距）				WAKELOC 被动（到达时间差）			
	Larsson		LM		使用 Larsson 的到达时间差		使用 LM 的到达时间差	
	含离群值	不含离群值	含离群值	不含离群值	含离群值	不含离群值	含离群值	不含离群值
avg	0.47 米	0.43 米	0.48 米	0.43 米	6.81 米	4.03 米	5.76 米	6.91 米
md	0.34 米	0.37 米	0.36 米	0.35 米	0.46 米	0.43 米	0.52 米	0.46 米
$\sigma(\cdot)$	0.49 米	0.25 米	0.35 米	0.24 米	16.64 米	10.59 米	15.18 米	16.83 米
最小值 $\|\cdot\|$	0.05 米	0.08 米	0.05 米	0.06 米	0。04 米	0.04 米	0.03 米	0.03 米
最大值 $\|\cdot\|$	4.07 米	1.31 米	2.02 米	1.27 米	107.33 米	64.74 米	68.81 米	68.81 米

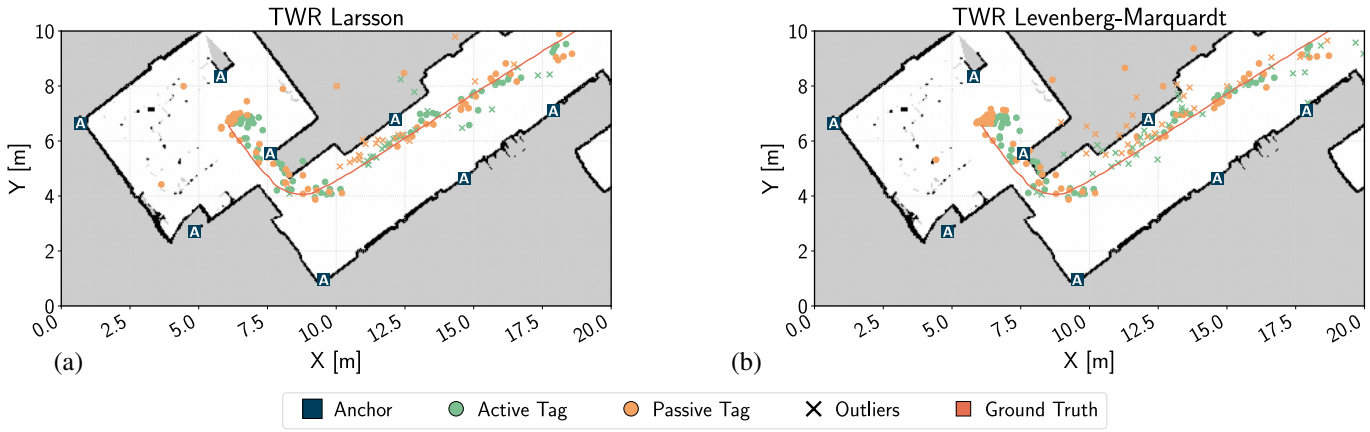


图7。 真实环境中动态物体的定位。(a)显示使用Larsson多边定位方法时的结果，(b)显示使用LM迭代时的结果。定位失败的离群值标记在以下情况：锚点过少（三个或更少），或在 20 次迭代内未能收敛。

由于Larsson算法偶尔会出现收敛失败，LM迭代的方差较低，因此最大误差也较小（2.02米，而4.07米）。被动标签的结果受到主动 标签位置测定精度较低以及非视距条件的显著影响——这一效应已在 [63]中得到证明。尽管中位数精度最高可达0.46米，但平均误差，尤其是最大误差，要大得多。了解建筑平面图后，便可检测并减少这些误差。

B. 计算成本与性能

本节结果基于第IV-B节所述的测量数据。对于所有求解器容差，微控制器周期的平均数量变化约为 15%，变化范围介于容差 10^{-2} 和 10^{-8} 之间。因此，迭代求解器若能成功收敛，通常会很快完成，这一点可从不同求解器容差下估计误差的变化极小看出。这里需要区分收敛所需的算法迭代次数与最终产生的周期数。Levenberg–Marquardt 求解器收敛所需的平均迭代次数为四次（无论是多边定位还是到达时间差）。我们将 20 次迭代设为截止阈值，以识别未收敛的情况。在多边定位中，LM迭代和 Larsson算法均在 95457 个案例中有 8 个未能收敛。在到达时间差计算中，未收敛的情况有 96 个分别是在使用活动标签的真实值数据时，以及使用估计值时出现的。

不同算法的计算成本列于表 III 和图6b)中。Larsson算法平均需要 2156 437 个时钟周期。基于LM的多边定位需要 267 244 个周期。对于到达时间差，针对被动标签的基于LM的求解器平均需要约 312 427 个周期。在图6b)中，可以清楚地看到迭代式求解器的各次迭代。

C. 功耗

锚点和标签（一个作为主动标签，另一个作为被动标签）在深度睡眠且唤醒接收器持续监听时的功耗，比单独使用 WAKEMOD 高.84µW–1.15µW。

表 IV 按设备类型和定位方法细分了传感器节点在一个定位周期内的能耗。主动标签的能耗最高，每次定位为 3.22mJ，因为它们会主动发送唤醒呼叫并启动测量。被动标签所需能量显著较少（951.16µJ），因为它们只接收并处理来自主动标签的信号。锚点的能耗取决于锚点的节点编号：每次定位产生 338.30 µJ 的基础能耗，另加每次定位 15.28 µJ ˆ，受 N_A 约束，如第 III-B 节所述。

定位持续时间决定了延迟和最大定位速率。持续时间和延迟为 84.52 ms 时，最大定位频率为 11.8Hz。

表 III根据定位类型和所用算法进行计算评估。数值以周期数和毫秒为单位。为便于阅读，表中列出以144MHz 微控制器时钟频率换算得出的执行时间（毫秒）。

	WAKELOC 主动式(TWR)				WAKELOC 被动式(TDOA)					
	Larsson		LM		基于真值（GT）的到达时间差		Larsson 的到达时间差		基于 LM 的到达时间差	
avg	2 156 437	14.98 毫秒	267 244	1.86 毫秒	317 035	2.20 毫秒	312 427	2.17 毫秒	312 445	2.17 毫秒
md	2 037 673	14.15 毫秒	271 548	1.89 毫秒	311 197	2.16 毫秒	311 630	2.16 毫秒	311 630	2.16 毫秒
$\sigma(\cdot)$	777 012	5.40 毫秒	67 046	0.47 毫秒	70 249	0.49 毫秒	54 194	0.38 毫秒	54 194	0.38 毫秒
最小值 $\|\cdot\|$	1 435 471	9.97 毫秒	122 750	0.85 毫秒	170 021	1.18 毫秒	170 902	1.19 毫秒	170 900	1.19 毫秒
max $\|\cdot\|$	61 419 270	426.52 毫秒	2 495 594	17.33 毫秒	1 434 213	9.96 毫秒	1 432 733	9.95 毫秒	1 433 041	9.95 毫秒

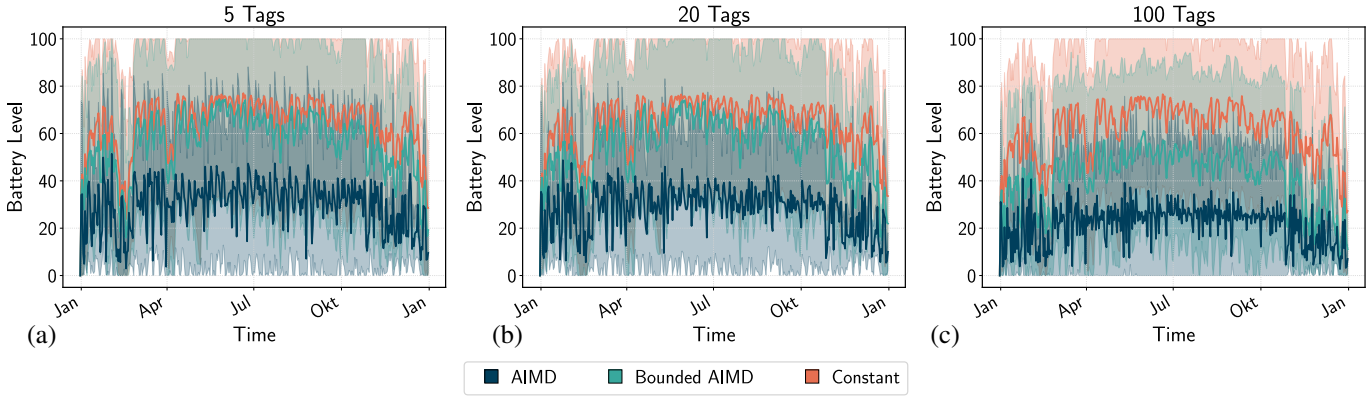


图8。 仿真年份内标签电池荷电状态的平均值，仿真条件为 (a)5，(b) 20，或 (c)100个标签。阴影区域表示标准差。

表IV传感器节点功耗明细。

		活动标签	无源标签	锚点
本地。	能量	3.22 毫焦	951.16 微焦	338.30 微焦 ＋15.28 微焦 · $\lceil (i-1) \bmod N_A \rceil$
	持续时间	84.52 毫秒	34.18 毫秒	30.55 毫秒 ＋290微秒 · $\lceil (i-1) \bmod N_A \rceil$
休眠	功率	7.84 μW	7.84 μW	7。84 μW

D. 能量感知仿真

仿真评估重点关注每个标签每天可实现的定位总数，以及电池全年荷电状态。

图8中的结果显示了标签在整个仿真期间的平均荷电状态。无论选择何种算法或网络规模如何，标签在模拟年份结束时都成功维持了 7% 的平均电量。加性增大乘性减小算法消耗的能量最多，其次是有界加性增大乘性减小算法和恒定速率算法。值得注意的是，加性增大乘性减小算法在这一年中的标准差最小，表明它能够很好地适应不同的光照条件。

此外，随着主动定位的标签数量增加，所有标签的能耗都会上升，因为被动定位次数增加。不过，这种影响仍然较小，原因有二：*i)* 主动定位的能耗约为被动定位的三倍；*ii)* 大多数新增的主动定位——尤其是在 AIMD 变体中——发生在能量较高的条件下供电。

锚点的荷电状态（SoC）高于标签，这反映出其活动程度和能耗较低。对于在低光能采集配置下运行的标签和锚点，基于 AIMD 的算法会根据式（1）中的度量指标检测电池状态下降，并将主动定位率降至零。此时，设备保持在最低睡眠状态，仅通过唤醒接收器（WuR）监听。然而，即使是这种最低限度的功耗也无法维持，因为 3.59μW 的平均采集功率不足以满足睡眠能耗和电池自放电的需求。因此，在这种光照配置下运行的所有标签和锚点，其电池都在当年很早的时候就已完全耗尽。

对于锚点，在所有测试的算法和网络规模下，年末的荷电状态中位数均介于30%至40%之间。然而，速率控制算法的选择会影响锚点电池电量较低（荷电状态为0%至25%）的频率：采用加性增大乘性减小时，所有锚点都属于这一类别；而有界AIMD和恒定速率则分别将这一比例降低至约60%和50%。增加标签数量对锚点的影响仅为中等程度。其平均荷电状态范围为29%（采用加性增大乘性减小）至39%（采用恒定速率），这表明即使标签数量不断增加，WAKELOC也能有效稳定锚点的能耗。

图9展示了三种模拟网络规模（5、20 和 100 个标签）下，每天每个标签的平均定位次数。AIMD和有界AIMD算法执行的定位次数远多于恒定速率

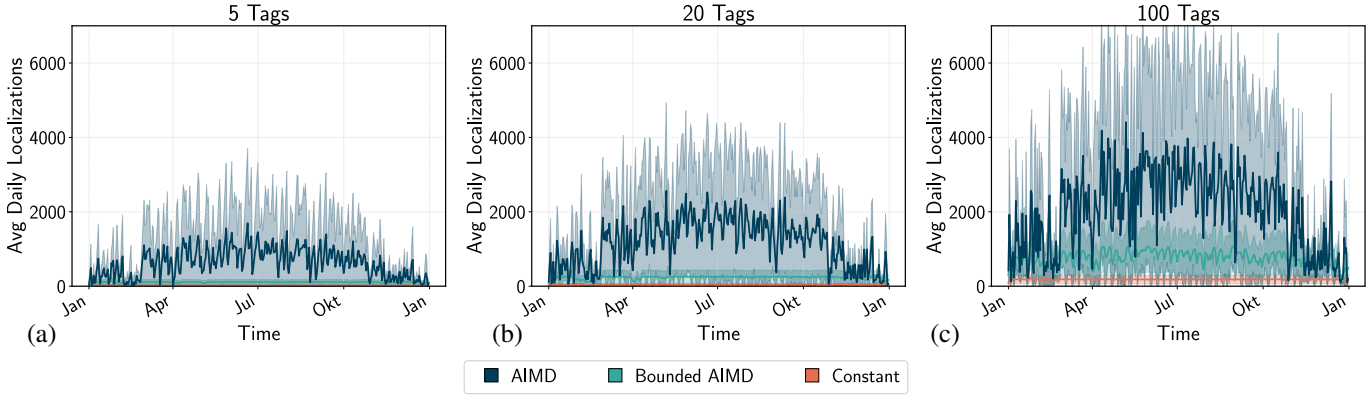


图9。 平均定位次数 对于采用（a）5个、（b）20个或（c）100个标签的仿真，每天每个标签的定位次数。阴影区域表示标准偏差 n.

表 V标签和锚点每日定位次数的统计数据。

	AIMD			有界加性增大乘性减小			恒定速率		
# 标签	5 T, A	20 T, A	100 T, A	5 T, A	20 T, A	100 T, A	5 T, A	20 T, A	100 T, A
avg	634, 199	1173, 1056	2031, 2554	105, 35	234, 186	761, 811	19, 7	42, 34	180, 182
md	154, 0	569, 274	1092, 1814	141, 0	281, 142	805, 848	24, 0	48, 24	193, 184
$\sigma(\cdot)$	886, 568	1375, 1397	2398, 2564	60, 74	167, 168	550, 568	10, 26	29, 38	123, 140
min	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0
max	4211, 4232	6194, 7935	14 354 , 14 341	295, 1681	576, 1739	3108, 5899	67, 1281	96, 1250	2807, 3083

算法。尤其是，这种活动增加主要发生在夏季月份，此时光照和由此获得的能量都高于平均水平。在七月光照最强的日子里，AIMD算法在部署100个标签的情况下，平均每天每个标签最多可实现2400次定位，而恒定速率算法则保持在约180次定位（主动与被动定位合计）。

表 V 总结了定位的统计参数。对于所有网络规模，AIMD 平均实现的定位次数最多（标签/锚点最多分别为 2031/2554 次），其次是有界AIMD（761/811 次）和恒定速率（180/182 次）。标准差也表明，定位次数很大程度上取决于日照可用性，这一点在大型网络中尤为明显。最小值为 0，说明没有能量的标签和锚点无法执行定位。使用 100 个标签时，定位次数最大值超过 13000 次，这证明 AIMD 方法具有良好的可扩展性，能够在能源可用性高时充分利用可用能量。此外，定位次数的分布表明，AIMD 和有界AIMD 对季节变化的适应尤为出色：它们能够高效利用光照充足的时段，而恒定速率则保持不变，不会调整资源。这证实了能量自适应算法的优势，尤其是在异质照明环境中，不同标签可用的能量差异显著。

与AIMD相比，有界AIMD算法的平均定位频率较低，但在光照强度极低时表现出优势。通过更积极地节约能量，有界AIMD能够维持较高的电池电量，使节点在能源可用性不足时仍能保持较高的定位频率。相比之下，标准 AIMD在此类场景中会大幅降低定位频率，因此在能量输入极少时，成功定位次数也会更少。

总而言之，与有界 AIMD 相比，AIMD 平均每天为每个标签实现了高出 $2.7\times$ to$6.1\times$ 的定位率；与恒定速率算法相比，定位率高出 $11.3\times$ to $33.7\times$ 。与此同时，年末标签的电池荷电状态分别仅低了 $1.6\times$ to $2.2\times$ 和 $2.9\times$ to $3.9\times$。这些数据共同表明，能量感知算法能够显著提高整个网络的定位率，同时不会过度损耗电池电量，并且基本满足年末平均电量维持在 7 % 的相同设计约束。

尽管算法参数是在平均光照条件下调优的，但该方案对光照更强的节点同样具有良好的扩展性：到年末，没有任何标签或锚点的电池状态仍高于 75%，这表明在异质光照条件下，可用能量得到了高效利用。

VI. 结论

本文提出了ECO-WAKELOC，这是一种可扩展且能量中和的超宽带室内定位系统，旨在解决能效与响应速度之间的根本性权衡。该系统将事件驱动运行与协作定位相结合，仅在需要时激活锚点，并允许被动标签机会性地利用主动标签的定位结果，在保持厘米级精度和可扩展性的同时降低协调开销。

所开发的传感器节点集成了WAKEMOD唤醒接收器、QORVO DWM3000 超宽带收发器和室内太阳能采集功能，在保持空闲监听的同时实现了7.84µW的超低休眠功耗。受控实验以及在四足机器人上的真实环境部署证实，该系统在不同条件和非理想锚点布置下均能稳健运行；主动标签的平均定位误差为21.89厘米，被动标签为25.70 厘米，而在真实动态场景中为43厘米。

能量表征和仿真研究证明了该系统的可持续性和能量中和能力。主动标签每次定位消耗 3.22mJ，被动标签消耗 951 µJ，锚点消耗 353µJ。本文提出的基于加性增大乘性减小原则的能量感知调度算法，会根据采集的太阳能量调整定位频率；在所有条件下，每个标签每天最多可进行 2031 次定位，同时确保模拟年份结束时节点的平均电池容量仍为 7 %，即使初始电池电量为 0 % 也是如此。

ECO-WAKELOC 可在有线基础设施不切实际的环境中实现免维护、高精度部署，例如现有建筑、临时设施或大规模物联网网络。其协作式、自适应能量设计表明，实时室内定位能够兼顾低延迟和能量中和，为在广泛应用中实现可持续、经济高效且灵活的部署铺平道路。

参考文献

[1]L.-W. Chen 和 C.-R. Chen，《用于微定位感知服务的厘米级室内定位与朝向检测》，

IEEE系统、人和控制论汇刊：系统，第 54 卷，第 10 期，第 6458–6468 页，2024 年。[在线]。获取地址：http: //dx.doi.org/ 10 1109 2024 3432615 . /

[2] TSMC. 。I. Silva、C. Pendao 和 A. Moreira，《面向工业应用的低成本室内定位系统真实环境部署》，IEEE传感器期刊，第 22 卷，第 6 期，第 5386–5397 页，2022 年。 [在线]。获取地址：http://dx.doi.org/ 10 1109 2021 3103662 . /

[3] JSEN. 。I. E. Bouazzaoui、S. A. R. Florez 和 A. E. Ouardi，《考虑传感器规格以提升室内定位中的 RGB-D同步定位与建图性能》，IEEE传感器期刊，第 22 卷，第 6 期，第 4970–4977 页，2022 年。 [ ] 10 1109 2021 3073676 在线。

[4] 获取地址：http://dx.doi.org/ 。/JSEN. 。S. Hayward、K. van Lopik、C. Hinde 和 A. West，《工业领域室内位置技术、方法与应用综述》，物联网，第 20 卷，文章编号 100608，2022 年。 [在线]。获取地址：http://dx.doi.org/ 10 1016 2022 100608 . /j.iot. 。A. K. Ramachandran

[5] Venkatapathy、A. Riesner、M. Roidl、J. Emmerich 和 M. t. Hompel，《Phynode：一种可实现能量中性运行的智能信息物理系统，用于 Phynetlab》，载于 Smart SysTech 2015；欧洲智能对象、系统与技术会议，2015 年，第 1–8 页。[6] P. Mayer、M. Magno 和 L. Benini，《用于事件驱动室内定位的自供能超宽带定位系统》，IEEE物联网期刊，第 11 卷，第 1 期，第 1272–1284 页，2024 年。 [在线]。获取地址：http://dx.doi.org/ 10 1109 2023 3289568 . /JIOT. 。Y. Chen、Y. Wang 和

[7] Y. Zhao，《采用能量采集蓝牙低功耗标签的房间级室内定位》，Electronics，第 13 卷，第 22 期，文章编号 4493，2024 年。

[ ] 10 3390 13224493 在线。获取地址：

[8] http://dx.doi.org/ 。/electronics M. Qi、B. Xue 和 W. Wang，《超宽带室内定位的锚点位置校准与补偿》，IEEE传感器期刊，第 24 卷，第 1 期，第 689–699 页，2024 年。 [在线]。获取地址：http://dx.doi.org/ 10 1109 2023 3329535 . /JSE

[9] N. 。R. Sayfoori、M.-H. Huang、A. Naderi、M. Bhatti、R. D. Frostig 和 H. Cao，《用于啮齿动物行为研究的高精度超宽带传感器实时定位系统》，IEEE传感器期刊，第 25 卷，第 13 期，第 25 551–25 559 页，2025 年。 [在线]。获取地址：http://dx.doi.org/ 10 1109 2025 3572031 . /JSEN. 。B. Yang、E. Yang、L. Yu 和

[10] A. Loeliger，《极端受限环境中用于无人机的高精度超宽带定位》，IEEE传感器期刊，第 22 卷，第 1 期，第 1020–1029 页，2022 年。 [在线]。获取地址：http://dx.doi.org/ 10 1109 2021 3130724 . /JSEN. 。Y. Li、B. Yu 和 L. Huang，《基

[11] 于自适应信道偏差估计的室内超宽带定位方法》，IEEE传感器期刊，第 25 卷，第 1 期，第 1339–1349 页，2025 年。 [在线]。获取地址：http://dx.doi.org/ 10 1109 2024 3493069 . /JSEN. 。M. Bilge，《超宽带技术作为基

[12] 于蓝牙低功耗的位置估计增强手段的评估》，2022 年。 [在线]。获取地址：https://arxiv.org/abs/ 2202 00558 。G.-C. Patru、L. ˘

[13] Flueratoru、I. Vasilescu、D. Niculescu 和 D. Rosner，《Flextdoa：使用超宽带设备实现稳健且可扩展的到达时间差定位》，IEEE Access，第 11 卷，第 28 610–28 627 页，2023 年。 [在线]。获取地址：http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS. 2023.3259320[14] T. Laadung、S. Ulp、M. M. Alam 和 Y. L. Moullec，《用于超宽带定位系统的新型主动-被动双向测距协议》，IEEE传感器期刊，第 22 卷，第 6 期，第 5223–5237 页，2022 年。 [在线]。获取地址：http://dx.doi.org/ 10 1109 2021 3125570 . /JSEN. 。B. P. Sullivan、P. G.

[15] Yazdi 和 S. Thiede，《工厂中实时定位系统（RTLS）技术的总拥有成本》，Procedia CIRP，第 120 卷，第 822–827 页，2023 年。 [在线]。获取地址：http://dx.doi.org/ 10 1016 2023 09 082 . /j.procir. 。E. Zurich，《Polymaps室内

[16] ¨ 地图应用》，访问日期：20.09.2025。[在线]。获取地址：https://ethz.ch/staffnet/en/organisation/departments/engineering-and-systems/polymaps.html [17] R. Ahmed、B. Buchli、S. Draskovic、L. Sigrist、P. Kumar 和 L. Thiele，《太阳能采集系统中具有最低能量利用保证的最优电源管理》，ACM嵌入式计算系统汇刊，第 18 卷，第 4 期，第 1–26 页，2019 年。 [在线]。获取地址：http://dx.doi.org/ 10 1145 3317679 . / M. N. K.

[18] Boulos 和 G. Berry，《医疗保健领域的实时定位系统（RTLS）：简明入门》，International Journal of Health Geographics，第 11 卷，第 1 期，文章编号 25，2012 年。 [在线]。获取地址：https://doi.org/ 10 1186 1476 072 11 25 . / -

[19] x- - T. Istomin、E. Leoni、D. Molteni、A. L. Murphy、G. P. Picco 和 M. Griva，《 Janus》，ACM交互、移动、可穿戴与泛在技术会议录，第 5 卷，第 4 期，第 1–33 页，2021 年。[在线]。获取地址：http://dx.doi.org/10.1145/3494978

[20] T. Polonelli、S. Schlapfer 和 M. Magno，“Decawave DW1000 与 DW3000 在低功耗双边测距应用中的性能比较”，载于2022年IEEE传感器应用研讨会（SAS），2022年8月。 [在线]。可访问：http://dx.doi.org/10.1109/sas54819. 2022.9881375

[21] F. Villani、E. Masina、T. Burger 和 M. Magno，“一款36nW超宽带唤醒接收器，灵敏度达-86dBm并具备寻址能力”，载于2024年IEEE国际电路与系统研讨会（ISCAS），2024年5月，第5页。 [在线]。可访问：http: //dx.doi.org/ 10 1109 58744 2024 10558556 。 /ISCAS . . G. Kazdaridis、N.

[22] Sidiropoulos、I. Zografopoulos 和 T. Korakis，“一种用于半主动式唤醒无线电的新型架构，实现超过-70dBm的灵敏度：演示摘要”，载于2021年第20届传感器网络信息处理国际会议，2021年5月，第398–399页。

[ ] 10 1145 3412382 3458782 在线。可访问：

[23] https://dx.doi.org/ 。 / . G. Verma 和 V. Sharma，“一种用于无线传感器网络中基于事件的环境监测的新型射频能量采集器”，IEEE物联网期刊，第9卷，第5期，第3189–3203页，2022年。 [在线]。可访问：http://dx.doi.org/ 10 1109 2021 3097629 。 /JIOT。 . V. Luder、L.

[24] Schulthess、S. Cortesi、L. R. Davis 和 M. Magno，“Anitrack：一种用于受控环境下动物追踪的高能效、时隙化且稳健的超宽带定位系统”，载于2025年第10届传感器与接口进展国际研讨会（IWASI），2025年7月，第1–6页。 [在线]。可访问：http://dx.doi.org/10. 1109/IWASI66786.2025.11121986[25] M. Zhao、T. Chang、A. Arun、R. Ayyalasomayajula、C. Zhang 和 D. Bharadia，“Uloc”，ACM交互、移动、可穿戴与泛在技术会议录，第5卷，第3期，第1–31页，2021年。

[ ] 10 1145 3478124 在线。可访问：

[26] http://dx.doi.org/ 。 / S. Cortesi、C. Vogt 和 M. Magno，“Wakeloc：一种利用唤醒无线电实现的超低功耗、高精度且可扩展的按需实时定位系统”，载于2025年IEEE INFOCOM——IEEE计算机通信会议研讨会（INFOCOM WKSHPS），2025年5月，第1–6页。 [在线]。可访问：http://dx.doi.org/ 10 1109 65812 2025 11152965 。 /

[27] INFOCOMWKSHPS . . D. Balsamo、A. S. Weddell、A. Das、A. R. Arreola、D. Brunelli、B. M. Al-Hashimi、G. V. Merrett 和 L. Benini，“Hibernus++：一种面向瞬态供电嵌入式设备的自校准自适应系统”，IEEE集成电路与系统计算机辅助设计汇刊，第35卷，第12期，第1968–1980页，2016年。 [在线]。可访问：http://dx.doi.org/ 10 1109 2016 2547919 。 /

[28] TCAD。 . D. Giouroukis、A. Dadiani、J. Traub、S. Zeuch 和 V. Markl，“物联网自适应采样与滤波算法综述”，载于第14届ACM分布式与事件系统国际会议会议录，2020年7月，第27–38页。 [在线]。可访问：http://dx.doi.org/ 10 1145 3401025 3403777 。 / 。 M. Giordano、S.

[29] Cortesi、P.-V. Mekikis、M. Crabolu、G. Bellusci 和 M. Magno，“面向资源受限物联网设备自我维持的能量感知自适应采样”，载于第11届能量采集与能量中性传感系统国际研讨会，2023年11月。 [在线]。可访问：http://dx.doi.org/10. 1145/3628353.3628545[30] L. Schulthess、S. Cortesi 和 M. Magno，“Wakemod：一款6.9 μW唤醒无线电模块，灵敏度达-72.6dBm，用于按需物联网”，载于2025年第10届传感器与接口进展国际研讨会（IWASI），2025年7月，第1–6页。 [在线]。可访问：http://dx.doi.org/ 10 1109 66786 2025 11122000 。 /IWASI . . I. Dotlic、A.

[31] Connell 和 M. McLaughlin，“利用载波频偏估计的测距方法”，载于2018年第15届定位、导航与通信研讨会（WPNC），2018年10月，第6页。

[ ] 10 1109 2018 8555809 在线。可访问：

[32] http://dx.doi.org/ 。 /WPNC。 . D. Coppens、A. Shahid、S. Lemey、B. V. Herbruggen、C. Marshall 和 E. D. Poorter，“超宽带标准与组织概览（IEEE 802.15.4、FiRa、Apple）：互操作性问题与未来研究方向”，IEEE Access，第10卷，第70 219–70 241页，2022年。 [在线]。可访问：http://dx.doi.org/ 10 1109 2022 3187410 。 /ACCESS。 . M.

[33] Ridolfi、S. V. de Velde、H. Steendam 和 E. D. Poorter，“高用户密度下超宽带室内定位解决方案的可扩展性分析”，Sensors，第18卷，第6期，第1875页，2018年。 [在线]。可访问：http://dx.doi.org/ 10 3390 18061875 。 /s R.

[34] Ramesh、A. John-Sabu、H. S、S. Ramesh、V. N. B、M. Arunachalam 和 B. Amrutur，“利用超宽带无线电实现基于TWR和TDOA的稳健可扩展定位技术”，第6页，2020年。 [在线]。可访问：https://arxiv.org/abs/ 2008 04248 。 J. Yang、B. Dong 和 J. Wang，“

[35] Vuloc”，ACM交互、移动、可穿戴与泛在技术会议录，第6卷，第3期，第1–25页，2022年。 [在线]。可访问：http://dx.doi.org/10.1145/3550286

[36] B. V. Herbruggen、D. V. Leemput、J. V. Landschoot 和 E. D. Poorter，“用于超宽带（UWB）室内定位系统的实时锚节点选择双向测距（TWR）”，IEEE Sensors Letters，第8卷，第3期，第1–4页，2024年。 [在线]。可访问：http://dx.doi.org/ 10 1109 2024 3363231 。 /LSENS。 . P. [37] Corbalan 和 G. P. Picco，“超宽带并发测距”，ACM Transactions on Sensor Networks，第16卷，第4期，第1–41页，2020年。 [ ] 10 1145 3409477 在线。可访问：http://dx.doi.org/ 。 / B. Großwindhager、M. Stocker、M. Rath、C. A. Boano 和 [38] K. R¨omer，“Snaploc”，载于第18届传感器网络信息处理国际会议会议录，2019年4月。 [在线]。可访问：http://dx.doi.org/ 10 1145 3302506 3310389 。 / 。 L. Santoro、M. [39] Nardello、D. Brunelli 和 D. Fontanelli，“扩展至无限规模：超宽带室内全球定位系统”，载于2021年IEEE机器人与传感器环境国际研讨会（ROSE），2021年10月，第8页。 [在线]。可访问：http: //dx.doi.org/ 10 1109 52750 2021 9611770 。 /ROSE . . M. Spirito 和 A. [40] Mattioli，“GSM移动台的双曲线定位”，载于1998年URSI信号、系统与电子国际研讨会会议录（目录编号98EX167），1998年10月，第5页。 [在线]。可访问：http://dx.doi.org/10.1109/ISSSE。 1998.738060[41] F. Gustafsson 和 F. Gunnarsson，“利用到达时间差测量进行定位”，载于2003年IEEE声学、语音与信号处理国际会议，2003年会议录（ICASSP ’03），2003年。 [在线]。可访问：http://dx.doi.org/10.1109/ICASSP。 2003.1201741[42]M. Kolakowski 和 V. Djaja-Josko，“用于超宽带定位系统的基于TDOA-TWR的定位算法”，载于2016年第21届微波、雷达与无线通信国际会议（MIKON），2016年5月，第1–4页。 [在线]。可访问：http://dx.doi.org/10. 1109/MIKON.2016.7491981[43]C. Zhang、C. Tang、H. Wang、B. Lian 和 L. Zhang，“无人机集群超宽带协作导航与定位数据集”，Scientific Data，第12卷，第1期，第486页，2025年。 [在线]。可访问：http://dx.doi.org/ 10 1038 41597 025 04808 0 。 /s - - - F. [44] Sutton、B. Buchli、J. Beutel 和 L. Thiele，“Zippy”，载于第 *13* 11 届ACM嵌入式网络传感器系统会议会议录。在线。可访问：http://dx.doi.org/ 2015 [ ] 10 1145 2809695 / 2809705 [45] T. Polonelli、F. Villani 和 M. Magno，“采用超宽带运行、面向位置感知对象的超低功耗唤醒接收器”，载于2021年第17届无线与移动计算、网络与通信国际会议（WiMob），2021年10月，第8页。 [在线]。可访问：http://dx.doi.org/ 10 1109 52687 2021 9606248 。 /WiMob . . R. [46] Piyare、A. L. Murphy、C. Kiraly、P. Tosato 和 D. Brunelli，“超低功耗唤醒无线电：硬件与网络综述”，IEEE Communications Surveys & Tutorials，第19卷，第4期，第2117–2157页，2017年。 [在线]。可访问：http://dx.doi.org/10.1109/COMST.2017.2728092[47] B. Chen、H. Ren、W. Gong、L. Lyu 和 C.-J. Shi，“一款915MHz、97nW、低面积唤醒接收器，采用包络跟踪混频器，实现-73.2dBm灵敏度”，载于2025年IEEE国际电路与系统研讨会（ISCAS），2025年5月，第1–5页。 [在线]。可访问：http://dx.doi.org/ 10 1109 56072 2025 11043883 。 /ISCAS . . M. Larsson 、 V. Larsson 、 K. Astrom 和 M. Oskarsson，“ 最优三边测量定位是一个特征值问题”，载于ICASSP 2019——2019年IEEE声学、语音与信号处理国际会议（ICASSP），2019年5月，第5586–5590页。 [在线]。可访问：http://dx.doi.org/ 10 1109 。2019 8683355 。 /ICASSP。 . [49] M. Larsson、V. Larsson、K. Astrom 和 M. Oskarsson，“将单源定位视为特征值问题”，IEEE Transactions on Signal Processing，第73卷，第574–583页，2025年。 [在线]。可访问：http://dx.doi.org/ 10 1109 2025 3532102 。 / TSP。 . A. Beck、P. Stoica 和 J. Li，[50] “源定位问题的精确解与近似解”，IEEE Transactions on Signal Processing，第56卷，第5期，第1770–1778页，2008年。 [在线]。可访问：http://dx.doi.org/ 10 1109 2007 909342 。 / TSP。 . Y. Zhou，[51] “最小二乘三边测量定位问题的闭式算法”，Robotica，第29卷，第3期，第375–389页，2010年。 [在线]。可访问：http://dx.doi.org/ 10 1017 0263574710000196 。 /S D. R. Luke、S. [52] Sabach、M. Teboulle 和 K. Zatlawey，“一种用于非光滑非凸单源定位问题的简单全局收敛算法”，Journal of Global Optimization，第69卷，第4期，第889–909页，2017年。 [在线]。可访问：http: //dx.doi.org/ 10 1007 10898 017 0545 6 。 /s - - - D. W. Marquardt，[53] “一种用于非线性参数最小二乘估计的算法”，Journal of the Society for Industrial and Applied 《数学》，第 11 卷，第 2 期，第 431–441 页，1963 年。 [在线]。获取地址：http://dx.doi.org/ 10 1137 0111030 。 / J. J. More，《 [54] Levenberg-Marquardt 算法：实现与理论》，《数学讲义》系列。Springer Berlin Heidelberg，1978 年，第 10 章，第 105–116 页。 [在线]。获取地址：http: //dx.doi.org/ 10 1007 0067700 。 /BFb F. Jiang 和 A. [55] Dhekne，“演示：ufiμ：一个用于定位研究及更多用途的开源集成式超宽带-Wi-Fi-惯性测量单元平台”，载于第 25 届国际移动计算系统与应用研讨会论文集，2024 年 2 月，第 156–156 页。 [在线]。获取地址：http://dx.doi.org/ 10 1145 3638550 3643628 。 / . Y. Ding、D. Shen、K. Pham 和 [56] G. Chen，“考虑接入节点高度的最小几何精度因子最优布设”，《IEEE仪器与测量汇刊》，第 74 卷，第 1–10 页，2025 年。 [在线]。获取地址：http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2024. 3497055[57] D. Plozza、S. Marty、C. Scherrer、S. Schwartz、S. Zihlmann 和 M. Magno，“在动态人类环境中使用基于二维激光雷达的人员跟踪器进行自主导航”，载于 2024 年 IEEE传感器应用研讨会（SAS），2024 年 7 月，第 1–6 页。 [在线]。获取地址：http://dx.doi.org/ 10 1109 60918 2024 10636369 。 /SAS . . D. Molteni、G. P. [58] Picco、M. Trobinger 和 D. Vecchia，“Cloves”，载于第 20 届 ACM嵌入式网络传感器系统会议论文集，2022 年 11 月，第 808–809 页。 [在线]。获取地址：http: // dx.doi.org/ 10 1145 3560905 3568072 。 / . L. Sigrist、A. Gomez 和 [59] L. Thiele，“数据集：室内太阳能采集轨迹记录”，载于第 2 届数据采集至分析研讨会论文集，2019 年 11 月，第 47–50 页。 [在线]。获取地址：http://dx.doi.org/ 10 1145 3359427 3361910 。 / . renata，“可充电锂离子聚合物电 [60] 池指南”，访问日期：05.09.2025。[在线]。获取地址：https: // www.renata.com/en/downloadfile/renata-rechargeable-lipo-guidelines/ ?fileid= f871fff174d88fe997723e20ed[61] F. Malivert、O. Labbani-Igbida 和 H. Boeglen，“用于同时定位无人机和超宽带锚点的三维多边定位比较与改进”，《应用科学》，第 13, 2, 1002, 卷 2023 [ ] 10 3390 13, 2, 1002, 期。在线。获取地 2023 [ ] 10 3390 址：http://dx.doi.org/ 。 /app 13021002 [62] D. Frisch 和 U. D. Hanebeck，“为什么不应使用到达时间差进行多边定位”，载于 2025 年 IEEE智能系统多传感器融合与集成国际会议（MFI 2025）论文集，得克萨斯州科利奇站，2025 年 9 月，访问日期：08.12.2025。 [在线]。获取地址：https://isas.iar.kit.edu/pdf/ MFI25 Frisch.pdf[63] R. Zandian 和 U. Witkowski，“基于超宽带设备的差分定位拓扑中的非视距检测与缓解”，载于 2018 年室内定位与室内导航国际会议（IPIN），2018 年 9 月，第 1–8 页。 [在线]。获取地址：http: // dx.doi.org/10.1109/IPIN.2018.8533781



Silvano Cortesi (GS'22) 获得了电子工程与信息技术专业的理学学士和理学硕士学位，分别于 ETH Z¨苏黎世，Z¨苏黎世，瑞士，于 2020 年和 2021 年获得。他目前正在 ETH Z¨苏黎世，Z¨苏黎世，瑞士的项目式学习中心攻读博士学位。他的研究聚焦于室内定位、超低功耗与自供能物联网、无线传感器网络和能量采集。



Lukas Schulthess （GS'22）于 2014 年获得瑞士电子技术员职业能力证书（EFZ）。他于 2020 年和 2021 年分别获得瑞士苏黎世联邦理工学院的电子工程与信息技术学士和硕士学位。¨目前，他正在瑞士苏黎世联邦理工学院攻读博士学位。¨他的研究兴趣包括超低功耗、微型化且可自我维持的传感器节点、无线体域网和能量采集。



Davide Plozza （GS'24）于 2020 年获得电子工程与信息技术学士学位，并于 2023 年获得机器人、系统与控制硕士学位，均毕业于瑞士苏黎世联邦理工学院。¨目前，他正在瑞士苏黎世联邦理工学院项目式学习中心攻读博士学位。¨他的研究重点是恶劣环境下资源受限四足机器人的鲁棒导航与运动。



Christian Vogt（M'20）于 2013 年和 2017 年分别获得苏黎世联邦理工学院电气工程与信息技术理学硕士学位和博士学位¨苏黎世¨苏黎世，瑞士。他目前是苏黎世联邦理工学院的博士后研究员兼讲师¨苏黎世¨苏黎世，瑞士。他的研究主要聚焦于低功耗应用中的信号处理，包括现场可编程门阵列（FPGA）、物联网、可穿戴设备和自主无人车辆。



Michele Magno（SM'13）目前是瑞士苏黎世联邦理工学院信息技术与电气工程系的高级科学家。自 2020 年起，他负责领导该校 D-ITET 项目式学习中心。他于 2004 年和 2010 年分别获得意大利博洛尼亚大学电子工程硕士学位和博士学位。自 2013 年起，他在苏黎世联邦理工学院工作，并曾在尼斯索菲亚大学、拉尼永国立高等电信与信号处理学院担任访问讲师或教授，以及 uni-博洛尼亚大学和中瑞典大学。他目前的研究兴趣包括智能感知、低功耗机器学习、无线传感器网络、可穿戴设备、能量采集和低功耗管理技术。他已在国际期刊和会议上发表了 280 多篇论文，并在 IEEE 活动中荣获最佳论文奖，同时因工业项目和专利获得认可。