Hawkeye：面向大规模毫米波反向散射的百米级距离亚厘米级定位

Kang Min Bae[†]、Hankyeol Moon[†]、Sung-Min Sohn[§]、Song Min Kim[¶]韩国

科学技术院（KAIST），[§]亚利桑那州立大学{bkm2259,moonkyul1, songmin}@kaist.ac.kr, smsohn@asu.edu

arXiv:2301.02402v1 [eess.SP] 6 Jan 2023

摘要

在广阔区域内对大量物体进行精确定位，是实现与物联网普遍交互的关键之一。本文介绍了 Hawkeye，这是一种新型毫米波反向散射系统，首次实现了：（i）百个量级目标的同时三维定位；（ii）亚厘米精度；（iii）百米级距离。Hawkeye 适用于室内和室外环境，也支持移动场景。Hawkeye标签采用范·阿塔阵列设计，在仰角和方位平面均具有回射性，可实现三维定位并有效抑制多径。Hawkeye 定位算法是一种轻量级信号处理方法，可与商用调频连续波雷达兼容。该算法独特地利用标签信号与杂波之间的相互作用，并借助频谱泄漏实现精细定位。在走廊、讲堂和足球场开展的原型系统评估表明，其中位数精度为 6.7 mm ，距离为 160 m，且仅用 33.2 ms便可同时定位100个标签。即使温度变化导致显著的振荡器频偏，Hawkeye 仍能可靠工作。

1. 引言

在一个区域内对大量分散的物体进行精确交互，长期以来一直是物联网的愿景，而精准定位则是实现沉浸式体验的基本特性之一。反向散射在实现这一目标方面具有巨大潜力：低成本、超低功耗的标签能够以最低的部署成本和维护工作量，大规模部署在广阔区域内。对部署在一定区域（例如百米级距离）内的大规模标签（例如数百至数千个）实现亚厘米精度定位，将有益于众多应用，包括资产追踪、库存管理、仓库自动化、智能工厂、虚拟现实/增强现实以及结构健康监测。

为此，研究人员已对 6 GHz以下频段中的反向散射（包括射频识别）定位进行了广泛研究。然而，其精度、可扩展性和距离从根本上受到严格带宽限制的制约

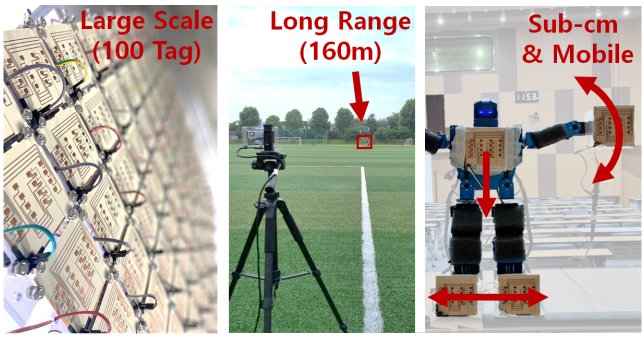


图 1：Hawkeye 在大规模场景（左）、远距离场景（中）以及移动物体上（右）进行了测试。

（例如，超高频射频识别的带宽仅为几十千赫）。这使其精度仅达几十个 cm 精度 [4, 8, 37, 45, 65]，并因要求固定的移动轨迹而限制了部署场景 [42, 50, 60, 62]，或需要在预先掌握信息的情况下部署密集的参考标签 [5,13, 58]。近期的一系列研究工作 RFind [33] 和 TurboTrack [32], 通过使射频识别能够模拟 220 MHz 的宽带宽（超出 ISM 频段），解决了带宽问题，从而实现亚厘米级精度。然而，为符合美国联邦通信委员会法规，距离被限制在数米以内，因此应用范围仅限于房间尺度，且需要定制读写器。最新的 Millimetro 工作 [55] 则采取了一种根本性的方法，利用调频连续波雷达和反向散射标签，探索 24 GHz毫米波频段中丰富的 250 MHz 带宽，实现超过 100 m 的距离。然而，Millimetro 的中位数精度仅为 15 cm，本质上相当于 24 GHz FMCW 雷达的精度。

本文介绍了 Hawkeye（图 1），这是一种毫米波反向散射定位系统，其实测性能为：(i) 中位数精度为 6.7 mm ；(ii) 距离为 160 m （@1D）；(iii) 仅用33.2 ms 即可同时定位 100 个标签（理论上可扩展至 1024 个标签）；(iv) 使用价格实惠的商用雷达（~200 美元 [17]）。Hawkeye 将一种用于高效信号传输的新型反向散射标签与轻量级雷达侧信号处理相结合，从而实现精确、快速的定位。Hawkeye 反向散射标签是一种平面范·阿塔阵列（VAA），与

[†]共同第一作者。
[¶]Song Min Kim 是通讯作者。

系统	5 米处的精度	距离	带宽	同步定位	固定轨迹
Hawkeye	**2.5 毫米**	**180 米**	**250 MHz**	**100 个标签（理论上为 1024 个）**	**No**
Millimetro [55]	78 毫米	180 米	250 MHz	6 个标签（理论上为 106 个）	No
RFind [33]	3.4 毫米	6 m	220 兆赫	No	No
TurboTrack [32]	5.1 毫米	10 m	100 兆赫	2 个标签	No
Tagoram [60]	10 毫米	12 m	6 兆赫	No	Yes

表 1：与当前最先进方法的比较

采用混合耦合器的高能效、低损耗 FSK 调制器相结合。该标签可在方位角（90° 视场）和仰角（140° 视场）方向进行回射，从而实现 3D 定位并有效抑制多径。该设计能够抵抗振荡器频偏，在低温（$9.45°C$）、高温（$38.43°C$）和室温（$23.7°C$）条件下的定位误差仅为 $4\ mm$ 。对于使用低端标签、面向不同部署场景的实际亚厘米级定位而言，这是一个关键特性。此外，单次询问可同时定位多达 1024 个标签（以 100 个标签进行评估），支持大规模快速定位。表 1 总结了其与当前最先进反向散射定位系统的比较，展示了 Hawkeye 在实现高可扩展性、长距离方面的独特优势

，

并同时提升精度。

Hawkeye 利用 Hawkeye 反向散射 FSK 信号与基于啁啾的调频连续波（FMCW）雷达之间的相互作用，相比单独使用 FMCW，将定位性能提升超过 $\times 60$ 倍。Hawkeye 标签经过调谐，可在整个 250 MHz 带宽内实现 -10 dB 的 S11；FSK 调制则通过反射网络与低损耗 $90°$ 混合耦合器的组合实现，这些组件经过协同优化，可实现高效的 VAA 反射。VAA 的使用，加上毫米波严重的信号衰减，自然抑制了多径干扰。据我们所知，Hawkeye 标签是首个具备调制能力的平面 VAA 毫米波反向散射设计。雷达侧亚厘米级定位被设计为 FMCW 解调之上的轻量级后处理，无需对商用调频连续波雷达作任何改动。具体而言，Hawkeye 定位算法基于近期提出的 HD-FMCW [11] 技术，该技术可从杂波噪声中分离出标签 FSK 信号。Hawkeye 的关键洞见是利用标签信号与杂波之间的关系，以及嵌入标签信号中的频谱泄漏特征，从中提取精确位置。Hawkeye 支持单雷达定位或多边定位，并在室内（走廊和教室）、室外（足球场）、非视距环境以及不同温度条件下评估了一维至三维定位，以验证其实际应用能力。

Hawkeye 是一种适用于毫米波反向散射的高精度、远距离、大规模定位技术，能够跟踪分布在一定区域内的多个物体，覆盖范围从

从家庭和办公室等日常空间，到库存管理和仓库等工业领域。Hawkeye 通过采用低成本标签并兼容价格实惠的商用雷达，降低了成本。总之，我们相信 Hawkeye 朝着实现普遍的标签部署与定位迈出了坚实的一步。我们的贡献有三方面：

- 我们设计了 Hawkeye，这是一种基于毫米波反向散射的亚厘米级定位系统，可在百米量级距离上工作，并能同时定位一千多个标签。
- 据我们所知，我们设计了首个具备调制能力的平面 VAA 毫米波反向散射系统。
- 我们基于 Rogers RO4003C 天线基板（采用平面 VAA 结构）和基于 VXCO 的印刷电路板控制板，制作了 Hawkeye 标签。我们制作了一百个标签，用于大规模同步三维定位。读取器基于商用 24 GHz 雷达 [1, 17]实现。
- 我们将在论文获接收后发布 Hawkeye 的源代码和 HFSS 标签设计文件，以促进社区未来的研究工作。

2. 背景

本节介绍 Hawkeye 的技术背景，随后概述其设计。

FMCW 雷达。FMCW 雷达利用频率随时间线性增加的啁啾。雷达附近的物体会反射发射出的啁啾，反射信号经过往返传播时延后返回雷达。FMCW 雷达将发射的啁啾与接收的啁啾（存在传播时延）混频，生成中频信号。通过对中频信号执行快速傅里叶变换来测量距离，其中每个反射物体都表示为一个信号，其距离频率 f_r 与传播时延成正比。

平面范·阿塔阵列。 平面范·阿塔阵列（VAA）会将信号被动反射回其入射方向，从而在方位角和俯仰平面上实现回射性。它是一种简单的天线阵列结构，其中二维平面内的中心对称天线对通过传输线（TLs）互连，传输线长度相差 λ_g （即导波波长，也就是电磁波在电介质中的波长）。

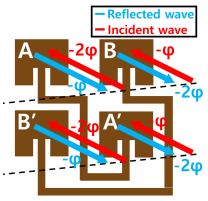


图 2：平面 Van Atta 阵列

通过中心对称方式互连的天线对会翻转入射信号的相位序列，从而将信号导向信号源。传输线引入的相位不会影响辐射方向，因为它对所有传输线的作用相同。作为一个示例图 2：考虑一个 2×2 平面 VAA，信号从方位平面入射，在 [A、B]和 [B'、A']处的相位序列均为$[-2\varphi, -\varphi]$。信号经过传输线传播后，相位序列反转，在 [A、B] 和 [B'、A']处均产生相位序列为 $[-\varphi, -2\varphi]$ 的反射信号。这使反射波沿入射方向返回，从而在方位平面实现回射性。仰角平面也以相同方式实现回射性：在 [A、B'] 和 [B、A']处反转相位序列。

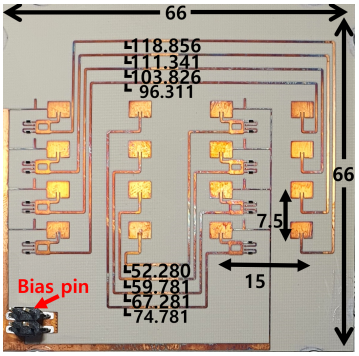
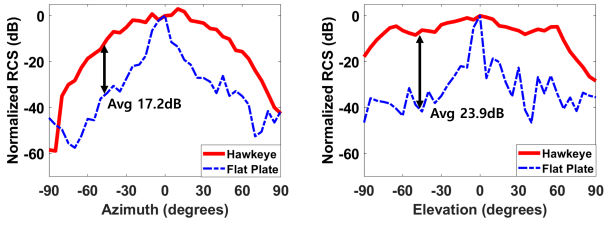


图 3：针对 24 GHz 频段优化了关键几何参数的 Hawkeye 标签。中心对称的天线对通过传输线互连。所有维度均以 mm为单位。



(a) (b

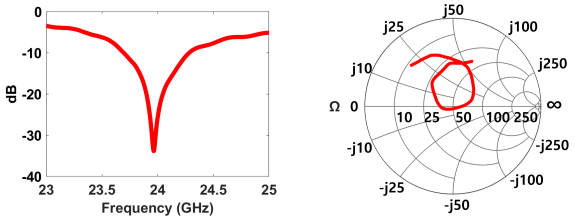
）图 4：Hawkeye 标签与尺寸相同且使用相同基板的平板的归一化单站雷达散射截面实测值对比：(a) 方位平面，(b) 仰角平面。在每种情况下，相较于平板，我们分别实现了超过 17.2 分贝和 23.9 分贝的波束成形增益。

3. HAWKEYE 标签设计

图 3 展示了 Hawkeye 标签原型，它独特地将 4×4 平面范·阿塔阵列与 FSK 调制相结合，为实现具有有效多径抑制能力的远距离亚厘米级三维定位奠定了基础。接下来，我们将详细介绍其结构和设计方案。

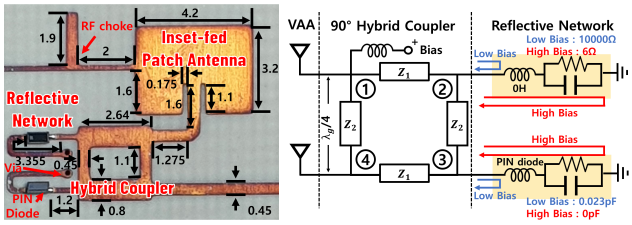
3.1 通过平面 VAA 实现回射性

如图 4 所示，Hawkeye VAA 实现了回射特性，平均波束成形增益为 17.2 分贝，方位角和仰角方向的视场（10 dB 波束宽度）分别为 $90°$ 和 $140°$。为满足 VAA 条件，中心对称的天线对通过传输线相互连接，其长度依据 $\lambda_g = 7.56\ mm$ 的导波波长确定，该波长由 24.125 GHz（即 24 GHz频段的中心频率）得出。具体而言，传输线长度之差为 λ_g 的整数倍。为将相位失配限制在 250 MHz 带宽内，传输线的最大长度与最小长度之差限制为 $9\lambda_g$。这使得最大相位失配为 $16.9°$，相当于波束成形功率损耗仅为 5×10^{-2}分贝。



(a) S11 (b) 史密斯圆图

图 5：Hawkeye 标签的实测天线性能，包括 (a) S11 和 (b) 史密斯圆图。



(a) (b)

图 6：(a) Hawkeye 标签的放大视图及关键几何参数。所有维度均以 mm 为单位。(b) 一对天线的等效电路，配有 $90°$ 混合耦合器和反射网络。

Hawkeye标签采用内嵌馈电矩形微带贴片天线，并通过 HFSS 参数扫描优化贴片、边缘缺口深度（即天线馈电点 [38]）和传输线尺寸，使其在 24 GHz 下实现 50 Ω 阻抗匹配。图 5 展示了通过矢量网络分析仪测得的天线性能；图 5(a) 描绘了整个 24 GHz 频段内 -10 dB 的天线响应（S11），图 5(b) 展示了相应的阻抗匹配结果。参数如图 6(a) 所示，采用 Rogers RO4003C 基板（介电常数 $\epsilon_r = 3.55$，损耗因子 tan $\delta = 2.7\times10^{-3}$），其中顶层承载 Hawkeye 标签电路，底层为接地板。最后，4×4 个天线单元经选择，以平衡回射性的视场与标签尺寸——即，

最大波束倾角[1] 超过 4×4后，其增幅相较于尺寸的指数级增长变得微不足道。

3.2 平面 VAA 的低损耗调制器

高效调制器会直接影响标签信号的信噪比，而信噪比决定了标签的检测鲁棒性。鉴于 Hawkeye 在 24 GHz 频段的整个 250 MHz 带宽内运行，本节将讨论其如何在不影响回射性的情况下有效实现 FSK 调制。图 6(b) 展示了天线对的等效电路表示，对应于图 6(a)。Hawkeye标签由 8 个这样的天线对组成，每个天线对都配有一个 90° 混合耦合器和一个反射网络，通过周期性 180° 相移实现 FSK 调制。如图 6(a) 所示，耦合器和反射网络均采用微带结构，并配有若干 PIN 二极管。这种结构使 Hawkeye 能够通过以下方式最大限度地提高信噪比：(i) 利用 90° 混合耦合器的低损耗特性，并结合对称的反射网络；(ii) 通过精心设计偏置并补偿耦合效应，在进行 FSK 调制的同时保持回射性，避免信号泄漏或失真。我们的设计整体实现了低损耗 FSK 调制，并与第4节介绍的独特定位算法相结合，为百米级距离支持奠定了坚实基础。

使用混合耦合器实现低损耗移相。Hawkeye通过（i） 180° 相移和（ii）混合耦合器，实现节能的频移键控，从而最大限度地降低Hawkeye标签处的反向散射反射损耗。如图 6(b)所示，相位会根据反射网络中信号路径的长度而 180° 翻转，并由 PIN 二极管的导通状态（高偏置）和关断状态（低偏置）控制。这种方式可保留入射信号功率，实现低损耗调制（相比之下，许多最先进的反向散射器通过单刀双掷开关在吸收和反射状态之间切换 [11, 39, 55] ——本质上牺牲了一半的询问信号功率（吸收期间））。为实现回射性，调制后的询问信号流入天线对的另一侧。通过图 6(b)中的混合耦合器和反射网络，可低损耗地实现这一点；二者作为阻抗匹配传输线工作（详情见本节后文）。另一种低损耗调制器是开关线移相器，它在两条长度不同的传输线之间切换。然而，与混合耦合器相比，这种设计需要 2× 更多二极管 [24] ，因而功耗和成本更高。虽然开关线移相器在外形尺寸方面具有优势，但在毫米波频段，这一优势并不显著。

[1]天线阵列的最大波束倾角为 $90^\circ - 47.83^\circ \times (\lambda/Md)^{1/2}$ [19]，其中 M、 λ 和 d 分别表示天线单元数、波长和天线间距。

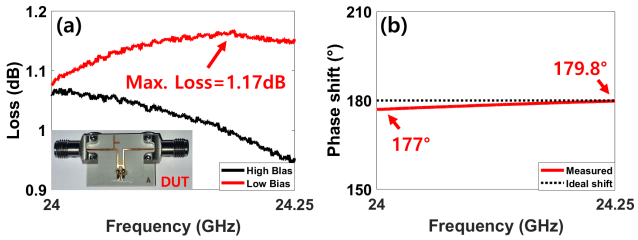


图7：在整个 24 GHz频段内，所制造的调制器单元的实测响应。(a) 低偏置和高偏置下的损耗；(b) 低偏置和高偏置之间的相移。

为了解Hawkeye移相器的工作原理，请参阅图 6(b)：入射询问信号由上天线（端口①）接收，并流入下天线（端口 ④）。为在进行频移键控调制的同时保持回射性，混合耦合器通过中间的反射网络，以低损耗将信号从端口 ① 传输至端口 ④。为此，混合耦合器作为阻抗匹配传输线工作，并通过以下方式实现低插入损耗 [24], ：入射信号经耦合器分为四条路径，每条路径都流入反射网络，再反射回耦合器——即$path_1$: ① → ② → ①、 $path_2$: ① → ③ → ①、 $path_3$: ① → ② → ④和 $path_4$: ① → ③ → ④。带有四条 $\lambda_g/4$ 传输线的混合耦合器使 180° 相位差出现在 $path_1$ 与 $path_2$之间，而$path_3$ 与 $path_4$ [49]之间的相位相同。通过保持四条路径中的信号振幅一致， $path_1$ 与 $path_2$ 在端口 ①处相互抵消。因此，上天线上不会辐射信号，从而最大限度地减小反射（即 S_{11}=0）。另一方面， $path_3$ 与 $path_4$ 在端口 ④ 处相长叠加，使下天线上的辐射最大化（即 $S_{41} = 1$）。总之，当四条路径中的信号振幅相同时，入射信号会从上天线最大程度地传输至下天线，等效地说，插入损耗达到最小。路径振幅比计算为 $path_1/path_2 = Z_2^2$ 和 $path_3/path_4 = Z_2/Z_2$ ，其中 $Z_1 = Z_2/\sqrt{Z_2^2 + 1}$ [49]。当比值为 1 时，可得 $Z_1 = 1/\sqrt{2}$ 和 $Z_2 = 1$，即 35.3Ω 和 50Ω。图7(a)中的矢量网络分析仪测量显示，低损耗低于 1.17 分贝；为进行精确测量，调制器与标签（图中的被测器件）隔离。

集成调制器和平面 VAA。 为了在 24 GHz 频段的整个 250 MHz 范围内实现精确的 180° 相移，我们采用图6(b)中的等效电路，并按照数据手册 [35]，用相应的电阻、电感和电容表示 PIN 二极管 MADP-000907-14020。此外，为了在与频移键控调制器结合时维持 VAA 回射性，应避免射频信号通过偏置线（用于驱动 PIN 二极管）泄漏

——泄漏会使相位失真并破坏回射性。Hawkeye 采用 $\lambda_g/4$ 开路短截线（即开路微带线 [15]）作为射频扼流圈，以防止射频泄漏，并在等效电路中将其表示为电感。通过大量 HFSS 参数扫描仿真确定参数值，其中包括传输线长度以及传输线之间的间隙，以补偿调制器与传输线之间的耦合效应。参数值见图3和图6(a)。如图7(b)所示，Hawkeye 调制器可实现精准的频移键控，最大误差为 3°（即 $[177^\circ, 179.8^\circ]$），这表明在 24 GHz 频段的整个 250 MHz 范围内，功率损耗仅为 3×10^{-3}分贝。射频扼流圈有效隔离了射频信号，隔离度超过 30 分贝，从而实现了频移键控调制的回射性。

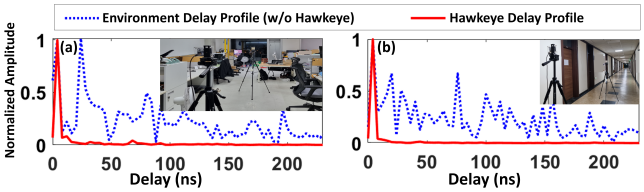
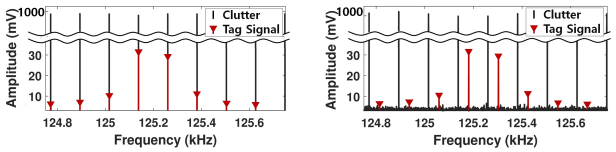


图8：（a）办公室和（b）走廊中的时延剖面。环境时延剖面展现了多径丰富的室内场景，时延跨度超过 230 微秒。Hawkeye 利用回射性有效抑制多径（即延迟）。

3.3 室内多径抑制

Hawkeye的回射性能够有效抑制多径，从而实现稳健的室内定位。图8展示了在办公室和走廊这两种多径丰富的室内环境中测得的时延剖面。在这两种场景下，Hawkeye都显著缩短了时延扩展，并将多径信号功率限制在比视距信号低20分贝或更多的水平。这是因为借助回射性，接收到的非视距（即多径）信号严格局限于信号发射的方向（而非像没有回射性时那样朝所有方向传播）。因此，回射性越强，时延扩展越小。图8中Hawkeye标签抑制的多径仅会在Hawkeye定位中引入 $8.8\,mm$（办公室）和 $2\,mm$（走廊）的误差（第4节），从而支持亚厘米级室内定位，如第5.3节所示。



（a）FMCW　（b）HD-FMCW [11]

图9：40 Hz 标签 FSK 下 FMCW 和 HD-FMCW 的中频。HD-FMCW 将标签信号与杂波分离。

4. HAWKEYE 定位

本节介绍Hawkeye如何利用商用雷达和Hawkeye标签，在百米级距离实现亚厘米级定位。从本质上说，这是一种精度极高的测距设计，可通过多个雷达（多边定位）或单个雷达扩展至二维/三维定位。总体而言，Hawkeye利用标签信号的频谱泄漏特征来提取超分辨率距离频率。我们的设计采用了 OmniScatter [11]中提出的一项近期HD-FMCW技术。我们首先简要介绍HD-FMCW，随后说明支持移动标签和大规模同时定位的亚厘米级定位方案。

HD-FMCW 入门。 一种近期提出的 HD-FMCW 技术，只需在商用调频连续波雷达上进行少量信号处理，就能在频域中有效分离 FSK 信号与杂波噪声。与使用单啁啾符号的传统 FMCW 相比，HD-FMCW 利用多个（周期性）啁啾符号，$s(t) = c(t) * \sum_{n=1}^{N} \delta(t - nT)$，其中 $c(t)$ 是持续时间为 T 的啁啾，N 是啁啾重复次数，并且

$*$ 是卷积。该询问信号经杂波（即杂波噪声）反射后，只会变为 $s(t - \Delta t)$，其中 Δt 是雷达与杂波之间的往返传播时延。由于它只是询问信号的时移版本，因此会保持 T 的周期。因此，在中频信号中，它表现为位于 $\frac{1}{T}$ Hz 整数倍频率分箱上的峰值，而其间的所有其他分箱均为零[2]。请注意，这适用于所有来源的杂波噪声——也就是说，所有噪声都集中在同一组频率分箱上，其他分箱则为零。相比之下，标签反射的询问信号（即标签信号）不仅发生时移，还受到标签 FSK 的调制。具体而言，标签信号为

$$\underbrace{s(t-\Delta t)}_{\substack{\text{Interrogation signal}\\ \text{(period } T\text{)}}} \cdot \underbrace{e^{j2\pi f_m t}}_{\substack{\text{FSK}\\ \text{(period } \frac{1}{f_m}\text{)}}} \tag{1}$$

其中，f_m 是 FSK 的调制频率。这会产生一个新的周期，不同于 T（即 T 和 $\frac{1}{f_m}$ 的最小公倍数）。因此，在中频中，标签信号和杂波噪声被置于不同的频率分箱中，从而将标签信号与所有环境杂波噪声隔离开来。图9展示了标签与杂波的分离情况：HD-FMCW（图9(b)）能够隔离标签信号，而原始 FMCW（图9(a)）则不能。

[2]根据傅里叶定理，[7], 时域中周期为 T 秒的任意信号，都可以表示为频域中 $\frac{1}{T}$ Hz 的倍数。

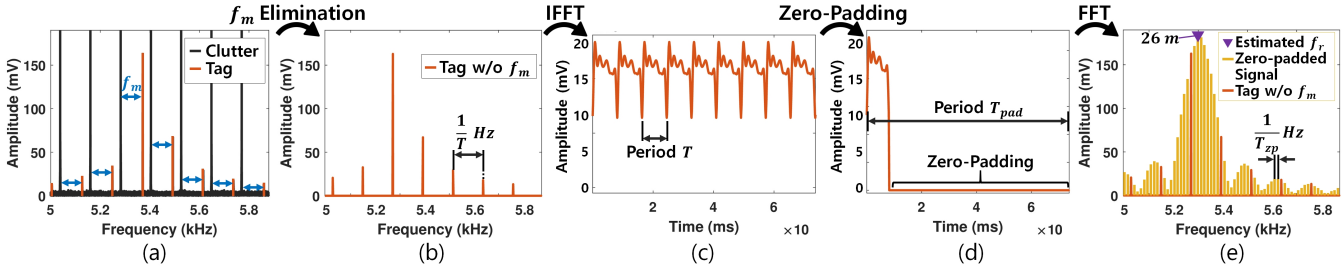


图 10：Hawkeye 单次定位过程。实时确定 f_m （a），使其与中频信号分离；随后对（b）仅含有 f_r （包括频谱泄漏）的分离干净信号进行快速傅里叶逆变换。在信号的（c）时域中，对时长为 T 的一段信号（d）进行补零，再执行快速傅里叶变换（e），以显示包络 sinc函数。选取峰值幅度最大的频率作为 f_r。

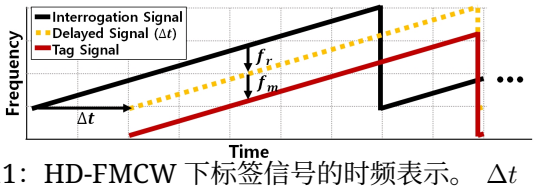


图 11：HD-FMCW 下标签信号的时频表示。 Δt 是雷达与标签之间的往返传播时延。

4.1 亚厘米级精度定位

Hawkeye定位巧妙地利用了 HD-FMCW 中隔离后的标签信号与杂波噪声之间的关系，以及嵌入在标签信号中的频谱泄漏特征。图11展示了反射的标签信号与询问信号之间的关系，其中两个信号之间的偏移由 f_r 和 f_m共同构成。距离频率 f_r 源自标签与雷达之间的传播时延 Δt ，而 f_m 是 FSK 调制频率。换言之，f_r 表示标签的真实位置，因此，精确定位可转化为求解 f_r的问题。该过程分为两步：（i）消除 f_m对标签信号与杂波噪声之间关系的影响；（ii）根据频谱泄漏特征精确估计 f_r 。下文将对此进行讨论。

消除标签调制 f_m。要准确估计距离频率 f_r ，首先需要消除标签调制 f_m 对中频信号的影响。需要指出的是，在实际应用中， f_m 并非预先已知；由于振荡器速率不稳定，必须实时检测。例如，晶体振荡器在不同环境下可能存在 $500\ ppm$ 的偏差 [40]。这意味着在 50 kHz 时会有 25 Hz 的误差，可能导致超过 $24.6\ cm$ 的巨大定位误差。Hawkeye 对振荡器偏差具有固有的鲁棒性，因为它能够即时检测出准确的 f_m ，而无需预先了解调制速率或标签安装环境。

为了精确识别 f_m，我们从以下事实出发： f_r 源于雷达与标签之间的传播时延，或者等价地说， $s(t-\Delta t)$（式 1），其周期为 T。相反， f_m源自周期为 $\frac{1}{f_m}$ 的 $e^{j2\pi f_m t}$ 的 FSK 信号。因此，如图 10(a) 所示，中频信号表现为频率间隔为 $\frac{1}{T}$ Hz（来自 $s(t-\Delta t)$）的峰值，并带有偏移 f_m （来自 $e^{j2\pi f_m t}$）。由此，只需根据与 $\frac{n}{T}$ Hz，$(n \in \mathbb{N})$ 频率分箱的偏移，即可实时精确确定 f_m 。我们注意到，这些频率分箱中含有杂波噪声。因此，为了去除 f_m，首先将杂波噪声置零，然后将标签信号移至这些置零的频率分箱。图 10(b) 展示了由此得到的干净信号，其中仅含有 f_r，不受 f_m 和杂波噪声的污染。这是一种实现亚厘米级定位的关键技术，可避免受到实际中普遍存在的标签时钟偏移的影响。

提取超分辨率距离频率 f_r。Hawkeye 通过提高频率分辨率，准确识别 f_r （表示标签与雷达的距离），从而实现亚厘米级定位。这与传统 HD-FMCW 不同，后者以$\frac{1}{T}$ Hz 的频率分辨率表示 f_r ，也就是与原始 FMCW 的频率分辨率相同。为此，Hawkeye 利用了离散傅里叶变换（DFT）中的频谱泄漏现象：周期为 T、频率为 f_r 的信号，其 DFT 表现为位于 $\frac{1}{T}$ Hz 的整数倍处的峰值，而其包络符合以 f_r 为中心的 sinc函数，即 $T\text{sinc}(\pi T(f-f_r))$ [46]。因此，准确推导 f_r 的问题就转化为对包络 sinc 函数进行细粒度识别，从而确定中心频率。为实现这一点，Hawkeye 对时长为 T 的子集进行零填充，使时域中的周期增至 T_{pad} （$\gg T$），如图 10(c)、(d) 所示。图 10(e) 展示了零填充的结果：频域中的峰值变得更加密集，从而能够精确呈现包络 sinc 函数。在实验中，我们将 $T_{\text{pad}} = 128T$ 设为该值，以降低计算开销，同时实现亚厘米级定位精度。凭借这些密集的峰值，只需将幅度最大的峰值所对应的频率作为中心频率 f_r 即可。

大量实验表明，Hawkeye 的距离中位误差为 2.5 mm；与中位误差为 15 cm 的原始 FMCW 相比，精度提升了 $\times 60$ 以上。借助超分辨率 f_r 采集机制，Hawkeye 在室外最远可实现 160 m 的亚厘米级定位，在室内则可达 80 m。值得注意的是，整个 Hawkeye 定位算法的计算复杂度为 O（Nlog N）（用于快速傅里叶变换/快速傅里叶逆变换），其中 N为样本数；这与原始 FMCW 的复杂度相同，后者必须运行快速傅里叶变换。

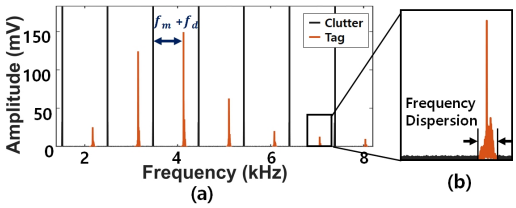


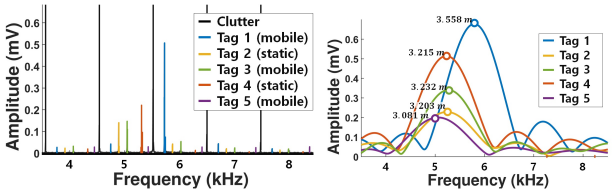
图 12：移动标签的中频信号。(a) 标签信号与杂波噪声相差 $f_m + f_d$，其中 (b) 变化的 f_r 会导致频率扩散。

4.2 移动标签

与静态标签相反，移动标签会产生多普勒频率 f_d 和时变距离频率 $f_r(t)$。图 12(a) 展示了移动标签的中频信号（静态标签见图 10(a)），其中 f_d叠加在 f_m 上。只需遵循上一节讨论的 f_m 消除机制，就能轻松地将 f_d 与 f_m 一并去除。另一方面，时变距离频率 $f_r(t)$ 会导致峰值频率扩散，如图 12(b) 所示。Hawkeye 通过细粒度时间分析，以亚厘米精度追踪 $f_r(t)$。对于移动定位，我们首先根据频率扩散区分移动标签与静态标签；频率扩散与标签速度[3]成正比。为实现亚厘米定位，我们将移动标签定义为在一个符号内移动距离小于 > 1 cm的标签。根据实证研究，这种移动表现为 ≥ 1.4 Hz 的频率扩散。随后通过以下方法追踪其移动。

提取时变距离频率 $f_r(t)$。移动标签的定位基本遵循与第4.1节相同的设计原则：消除移动标签信号f_m，以运行快速傅里叶逆变换（图10(a)-(c)），从而在时域中重建距离频率（即$f_r(t)$）。随后，可对每个持续时间为 T $f_r(t)$的子集进行零填充，以显示对应时刻的精确位置（图10(d)、(e)）。通过选择位置更新间隔，可以配置 Hawkeye 移动定位，在时间粒度和计算开销之间取得平衡。例如，可对 $f_r(t)$应用零填充，采用 520 T 间隔，每秒提供 60 次定位更新（在 $T = 32$ μs）。我们的评估显示，人形机器人的中位误差为 2.6 mm，速度为 17 cm/s，证明了 Hawkeye 可用于移动标签定位。我们指出，Hawkeye 的微小改动使移动定位的计算复杂度仍为 $O(N\log\ N)$。

[3]这在雷达语境中称为扩散因子 [22]



（a）5 个标签的中频　　（b）定位

图 13：5 个标签：（a）单次询问得到的中频；（b）定位结果。

4.3 大规模单次定位

Hawkeye 的轻量级定位可直接扩展至大规模场景，通过单次询问同步定位移动和静态 Hawkeye 标签。例如，在一台性能一般的台式电脑（i7-8700，32 GB 内存）上，定位 100 个标签的端到端耗时（3.2 ms 询问 +30 ms 处理时间）不到 33.2 ms。我们在第 5.6 节验证了对 100 个标签的同步定位，其中每个标签都根据其独特的调制频率进行识别。定位过程针对每个标签迭代执行，以便在提取准确的距离频率前消除标签调制。图 13(a) 展示了对 5 个移动和静态标签的同步定位，其中调制频率为 200、500、890 Hz 的标签是移动标签，调制频率为 350、770 Hz 的标签是静态标签。图 13(b) 展示了每个标签均成功定位的结果，各标签信号根据调制频率加以区分。需要指出的是，Hawkeye 在 32.8 ms 询问信号下最多支持 1024 个标签（$T = 32$ μs 和 $N = 1025$），这意味着各标签 ID 之间的间隔为 30.5 Hz。充足的 ID 空间能够容忍低端晶体振荡器中超过 500 ppm 的频率偏移，体现了 Hawkeye 在实际应用中的可扩展性。强大的可扩展性，结合远距离定位和反向散射标签，可实现广域覆盖。

4.4 雷达设置

多边定位。Hawkeye 能够支持无缝二维/三维标签定位：多个 Hawkeye 雷达可同时询问 Hawkeye 标签以进行多边定位。本质上，Hawkeye 平面VAA标签会将询问信号反射回源雷达，从而实现并发询问，并有效避免雷达之间的标签信号干扰。因此，Hawkeye 雷达无需访问控制即可部署用于多边定位。此外，Hawkeye 雷达可以进行时间同步，利用网络时间支持移动标签的二维/三维定位。

协议 [43]。该协议可在局域网中实现亚毫秒级精度；对于典型的人类奔跑速度 13 $kmph$，一毫秒误差会转化为 3.6 mm 定位误差，从而保持亚厘米级精度。

单雷达定位。利用 MIMO雷达的到达角，可实现单雷达二维/三维定位。与多边定位相比，单雷达定位以牺牲精度为代价，降低了部署成本（所需雷达数量更少）。到达角精度不足造成的定位误差会随距离增大而放大。例如，到达角误差为 $5°$ 时，会导致 8.7 m 的定位误差（100 m (100 $m \times 0.087$ rad)）。单雷达定位的演示见第 5.4 节。

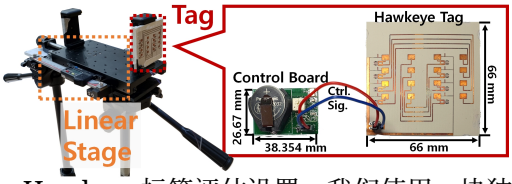


图14：Hawkeye标签评估设置。我们使用一块独立的控制板向标签提供控制信号。标签安装在直线滑台上，其分辨率为 0.01 mm。

5. 评估

本节介绍 Hawkeye 的实现细节和评估结果。

5.1 实现

Hawkeye雷达基于 Eval-TinyRad（Analog Devices） [1] 商用 24 GHz雷达实现，并在该平台上验证了 Hawkeye定位的运行情况。雷达将中频数据发送至 PC，由 PC 收集数据并执行 Hawkeye定位。为向 Hawkeye标签传送控制信号，我们使用了一块小型定制控制板，配有压控晶体振荡器（即电压控制晶体振荡器），尺寸为 26.67 $mm \times 38.354$ mm，如图14所示。该控制板采用 Skyworks 515NDAM 134200BAG [53] 振荡器，以较低的 20 ppm 波动生成f_m 。为控制压控晶体振荡器的频率，我们将可变电阻与纽扣电池组合使用，并采用低压差稳压器（东芝 TAR5SB33 [56]）稳定电压。大规模定位还采用了 Arduino Uno 作为控制板，其提供的 f_m 范围更宽（带宽为 4 兆赫，$0-4$ 兆赫），而压控晶体振荡器的带宽为 25.2 赫兹（ 134.1748 − 134.2252 千赫）。

标签功耗。Hawkeye标签由16个 PIN 二极管（Macom MADP-000907-14020）组成，并配有独立的控制板进行操作。标签功耗会随控制信号电压而显著变化，因为二极管在控制电压较高时会消耗更多功率。图15展示了我们对标签与雷达距离下、使用询问信号时功耗与信噪比关系的评估——

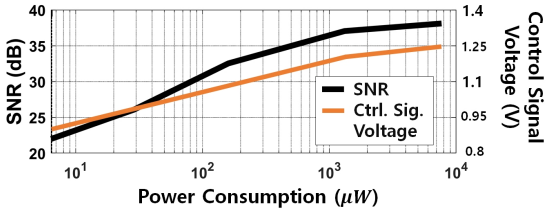
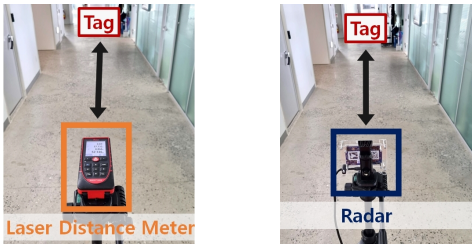


图15：绘制了功耗（不包括控制板功耗）随信噪比的变化曲线，测量时的标签与雷达距离为 2.4 m，发射功率为 6.45 dBm 。功耗范围为 6.4 μW 至 7.68 mW。



(a) (b)

图16：为获取定位的真实值，我们使用安装在三脚架上的 (a) 分辨率为 1 mm 的激光测距仪，然后 (b) 将雷达安装到三脚架上进行评估。

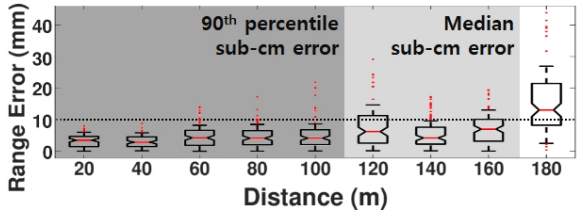
结果。功耗根据二极管电流-电压数据 [34]计算得出。结果表明，0.9 V 的控制信号电压（即标签以 6.4 μW 功率运行）足以使 Hawkeye 标签在 2.4 m距离下正常工作，且信噪比超过 20 dB 。同时，我们通过使用 Libero SoC SmartPower [41]对一款集成电路进行仿真，分析了控制板的功耗。仿真包含一个环形振荡器和一个调制器电路，功耗结果为 2 μW。因此，Hawkeye 标签可在 8.4 μW 功率下运行，可轻松通过能量采集 [63], 供电，或使用一颗 1000 mAh 纽扣电池运行40.7年。

5.2 评估设置

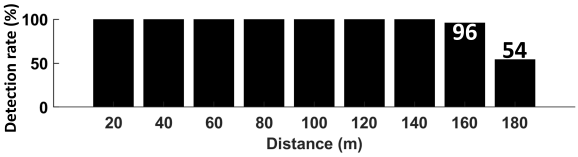
默认情况下，我们使用 Analog Devices Eval-Tinyrad 作为 Hawkeye 雷达进行评估，具体雷达参数设置如下：带宽为 250 MHz（24 GHz 至 24.25 GHz），发射功率为 8 dBm，中频采样频率为 1 MHz，每个啁啾包含 8192 个采样点，询问信号包含 2048 个啁啾。除非另有说明，Hawkeye 采用单发射天线和单接收天线进行全向操作。我们注意到，PCB 制造和焊接误差可能导致每个标签产生不同的距离偏移，因此我们通过测量已知距离处标签的距离偏移来进行校准。在所有评估中，Hawkeye标签均安装在亚克力板上，以避免不必要的电耦合。我们使用 Arduino Uno 作为控制板，为 Hawkeye标签提供 1.3 V 控制电压。



(a) Hawkeye一维定位实验中的标签部署，每隔 20 m在 180 m 处进行。



(b) Hawkeye一维定位结果的箱线图。



(c) Hawkeye的检测率。 Hawkeye标签可实现稳定定位，最远达 160 m。

图17：一维定位评估的设置与性能。

真实值。为获得精确的定位真实值，我们在雷达端使用分辨率为 1 mm 、测距范围最高可达 200 米的激光测距仪（Leica DISTO D510 [27]），如图16所示。首先，使用安装在三脚架上的激光测距仪测量标签与雷达的距离，随后将 Hawkeye 雷达安装在同一三脚架上进行评估。在标签端，如图14所示，我们使用分辨率为 0.01 mm 、测距范围最高可达150 mm 的直线滑台（Soar STMX1020-D [54]）。Hawkeye标签安装在直线滑台上，由滑台移动标签进行评估。激光测距仪导致的真实值误差不超过 1 mm。对于移动标签评估，我们使用 OptiTrack PrimeX [47]（精度为 0.2 mm 3D）获取真实值。

5.3 一维定位

为验证 Hawkeye 在百米量程下的亚厘米精度，我们在足球场进行了一维定位实验，沿直线测量，最远达 180 米。如图 17(a) 所示，每隔 20 米放置一个 Hawkeye标签；在每个 20 m 位置的 20 个不同位置上，共进行了 100 次实验试次。图 17(b) 展示了 Hawkeye 一维定位的性能，其中箱体边缘表示 75th 和 25th 百分位误差，须线表示90^{th} 和 10th 百分位误差。超出 90^{th}和 10th 百分位误差范围的数据被视为离群值，并以须线外的红点标出。Hawkeye 实现了亚厘米精度，90th 百分位误差最高达 100 m，其中误差为 8.9 mm。此外，在160 m 范围内仍能保持亚厘米精度， 50th 百分位（即中位数）误差下，中位误差在 160 m处为 6.7 mm ，展现了成功实现百米量程亚厘米级定位。对于控制信号，Arduino Uno 会生成 150 千赫 f_m。图 17(c) 展示了 Hawkeye 的检测率；在 140 m以内，检测率达到 100%，而在 160 m 和 180 m处分别降至 96% 和 54%。百米量程下的亚厘米精度证明了 Hawkeye标签的鲁棒性，也体现了 Hawkeye定位的高效性。

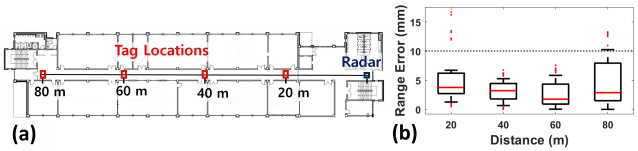


图18：（a）Hawkeye的室内走廊实验装置，标签每隔 20 m 放置在雷达前方。（b）走廊实验结果的箱线图。

室内一维定位。我们进一步评估了多径丰富的走廊中的一维定位，以验证 Hawkeye 在室内的运行情况。如图18(a)所示，走廊实验沿直线进行，最远至 80 m 。标签每隔 20 m放置一个；在 20 m 个位置中的每个位置，均进行了50次实验。图18(b)绘制了室内一维定位的箱线图。在80米范围内，中位误差始终低于 4 mm ，验证了 Hawkeye 即使在室内也能实现亚厘米级定位。距离达到 80 m时，检测率仍保持在100%。这些结果充分证明了 Hawkeye 标签的多径抑制能力。

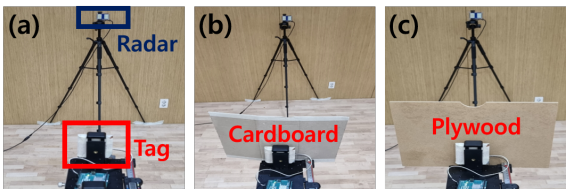


图19：用于测试室内环境中遮挡影响的实验装置：(a) 无遮挡（视距）；(b) 有硬纸板；(c) 有胶合板。

	LOS	硬纸板	胶合板
中位数（毫米）	2.2	3.4	5.7
90th 百分位（毫米）	5.9	5.7	11.9

表2：存在遮挡时的一维定位精度。

抗遮挡和温度变化鲁棒性。物联网应用在实际使用中可能会面临各种环境变化。为了验证 Hawkeye 能否普适部署，我们分析了两种常见误差来源——遮挡和温度变化对一维定位性能的影响。

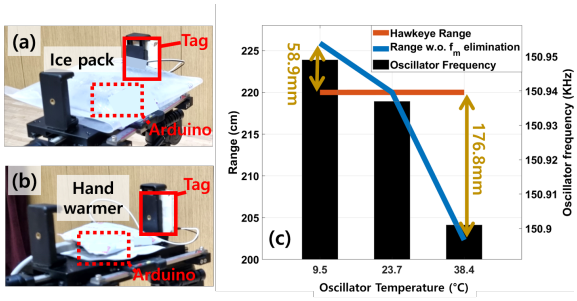


图20：用于测试室内环境温度影响的实验装置：(a) 冰袋；(b) 暖手宝。(c) Hawkeye 可有效消除振荡器不稳定性的影响。

实验在室内音乐厅进行，标签与雷达的距离设为 $2.2\ m$。每项实验在 4 个不同位置共进行 40 次试验，使用 Arduino Uno 作为控制板。图19展示了遮挡实验的布置，其中使用厚度为 $3.25\ mm$ 和 $5\ mm$ 的硬纸板和胶合板作为遮挡材料。实验结果汇总于表2：硬纸板和胶合板遮挡分别使定位误差中位数增加了 $1.2\ mm$ 和 $3.5\ mm$。结果表明，即使在非视距条件下，Hawkeye 仍能保持亚厘米精度，证明了其对遮挡的鲁棒性。我们还评估了温度变化下的定位性能（即振荡器不稳定导致的 f_m 变化），以展示 Hawkeye 消除 f_m 影响、实现精确定位的能力。如图20所示，评估时将 Arduino 振荡器的温度设为 $9.54°C$、$23.7°C$ 和 $38.43°C$。在每种温度下，f_m 在 150.901 kHz 至 150.949 kHz 之间变化，显示出控制板存在较高的频率不稳定性。为控制振荡器的温度，如图20(a)和(b)所示，控制板周围放置了冰袋或暖手器。图20(c)比较了使用和未使用 Hawkeye f_m 消除功能时的定位结果。未进行 f_m 消除时，$9.54°C$ 和 $38.43°C$ 温度下产生的误差分别为 $58.9\ mm$ 和 $176.8\ mm$。相反，启用 Hawkeye 的 f_m 消除功能后，$9.54°C$ 和 $38.43°C$ 温度变化所产生的误差均低于 $4\ mm$。总而言之，这些结果证明 Hawkeye 在各种环境下都能保持良好性能。

5.4 二维定位

我们在带有轨道的足球场上评估百米量程二维定位，使用两个雷达和一个标签进行多边定位。如图 21(a) 所示，两个雷达与标签相距 $100\ m$，雷达以 30° 入射角询问标签。两个雷达之间的距离为 $100\ m$，

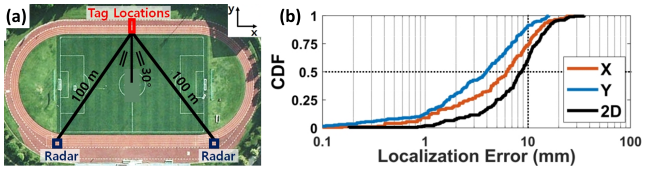


图21：(a) 二维定位实验的实验装置。标签与两台雷达构成边长为 $100\ m$ 的等边三角形。(b) Hawkeye 二维定位误差的累积分布函数。

标签调制频率为 f_m，即 150 千赫。实验共进行了 400 次实验试次，在直线滑台沿正 y 方向移动时，于 20 个位置进行标签定位。图 21(b) 绘出了二维定位误差的累积分布函数，Hawkeye 实现了 $8.7\ mm$的亚厘米级中位误差，二维定位精度达到 $15.9\ mm$ 百分位的 90th。沿 x 和 y 维度的中位误差分别为 $6.2\ mm$ 和 $4\ mm$，而90^{th} 百分位误差分别为 $13.6\ mm$ 和 $9.8\ mm$。二维定位本质上需要回射性，而 Hawkeye 标签的高回射性使其成为可能。在百米量程下实现亚厘米级二维定位，展现了 Hawkeye 在实际应用中的能力。

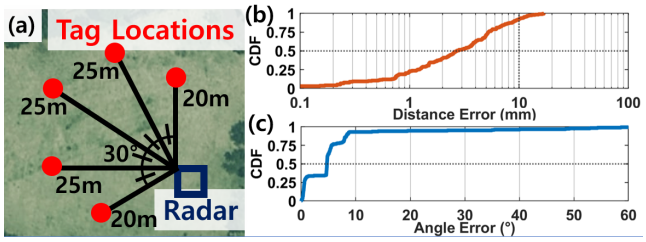
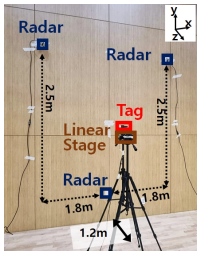


图22：使用单雷达时 Hawkeye 二维定位误差的累积分布函数。

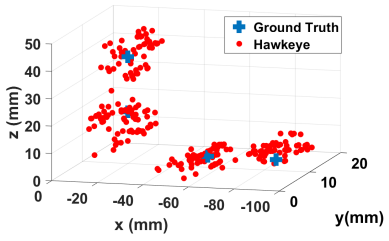
单雷达二维定位。评估了 Hawkeye 利用到达角进行的单雷达二维定位。在开阔场地进行评估，定位距离范围为 20 至 $25\ m$，到达角范围为 $-60°$ 至 $60°$，如图 22(a)所示。每个位置均进行 30 次实验试次，共测试 6 个不同位置。图22(b)和(c)展示了距离误差和角度误差的累积分布函数，其中位误差分别为 $2.7\ mm$ 和 $4.7°$，90th 百分位误差分别为 $9.04\ mm$ 和 $8.4°$。总体而言，中位二维误差为 $2.08\ m$，采用更大的天线阵列可提高精度。

5.5 三维定位

为验证 Hawkeye 的三维定位性能，我们在室内音乐厅中进行了一项定位实验，三部雷达固定在墙上。雷达的位置如图23(a)所示，假设标签中心位于 (0, 0, 0)，三部雷达的坐标分别为 (1.8, 1.25, -1.2)、(1.8, -1.25, -1.2) 和 (0, -1.25, -1.2)。



(a) 三维装置。



(b) 定位结果。

图23：(a) 在室内音乐厅进行的三维定位实验装置。(b) 四个标签位置处的示例定位结果，其中绘出了中位误差范围内的估计点。

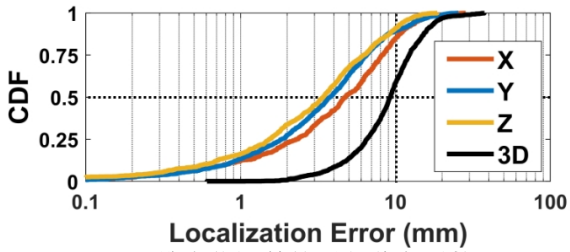


图24：三维定位误差的累积分布函数 ror.

(0,0,0)为标签中心。使用信号发生器 [21] 为 1.15 V提供标签控制信号，进行三维定位实验。利用直线滑台，在 xz平面上的23个位置进行了共1840次实验试次。图24展示了三维定位误差的累积分布函数，中位误差为 8.9 mm ，百分位误差为 13.8 mm，均低于1厘米。对于每个x, y, z维度，中位误差分别为 5.9 mm、 2.7 mm、3.4 mm ，百分位误差分别为 11.2 mm、 8.5 mm、8.8 mm 。图23(b)展示了标签位于四个位置时的一个代表性定位结果，其中在三维空间中绘出了中位误差范围内的估计点。在室内空间成功实现亚厘米级三维定位，证明了 Hawkeye 标签在方位角和仰角平面上的回射性能，同时为 Hawkeye定位的实用性奠定了坚实基础。

移动标签的同时定位。我们评估 Hawkeye 同时定位移动标签的能力：将五个 Hawkeye 标签分别固定在人形机器人 [14]的身体中心、双腿和双臂上。每个标签同时以独特的 f_m 在 150 千赫至 151 千赫之间进行调制。实验在室内音乐厅进行，设置与图23(a)相同。机器人尺寸为 $48 \times 36cm$，配备 16 个伺服电机。雷达设置为每个啁啾采集 1024 个样本，并使用 2048 个啁啾作为探测信号。如图25所示，实验捕捉了抬臂、坐下和分腿三种动作，最大移动速度为 17 厘米/秒。每种动作共进行了 90 次实验试次，

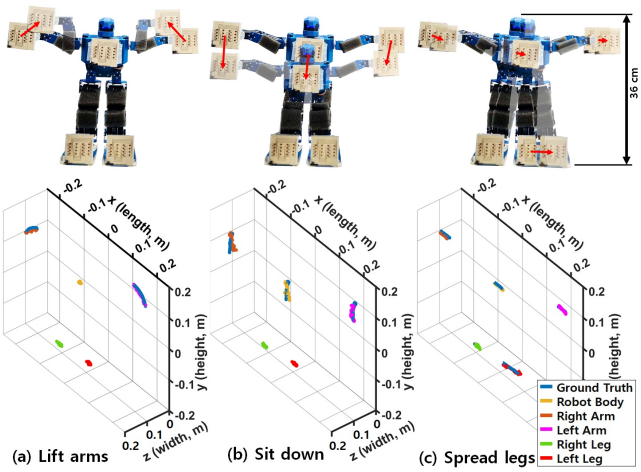


图25：机器人动作及相应的定位结果。

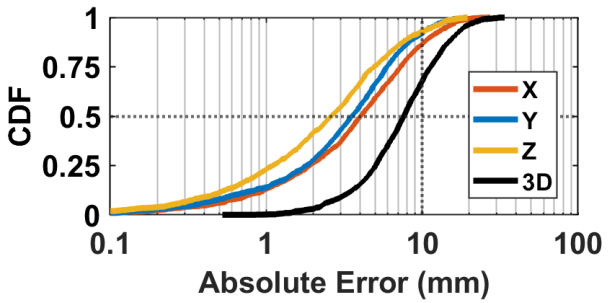


图26：移动机器人产生的三维定位误差累积分布函数。

机器人位于三个不同位置。如图所示，以 23.5 的定位帧率捕捉了机器人的三种动作，并同时提供 OptiTrack 测得的真实值。图26展示了累积分布函数，其中三维定位的中位误差为 7.66 mm， 90th 百分位误差为 15.96 mm。对于每个 x， y， z维度，中位误差分别为 4.05 mm、3.53 mm、2.59 mm， 90th 百分位误差分别为 11.13 mm、9.07 mm、8.31 mm 。这验证了 Hawkeye 在实际应用中对移动标签进行单次定位的能力。

5.6 大规模定位

为验证 Hawkeye 对大规模场景的支持能力，我们在室内环境中进行了同时定位 100 个标签的三维定位实验。图 28(a) 展示了 100 个标签的排列方式：它们以 10×10 的阵列部署在一块亚克力板上。标签以 5 mm 的间隔密集部署，以展示其在恶劣环境（例如仓库中物品堆叠的场景）下的运行情况；在这类环境中，标签之间存在显著耦合。100 个标签同时以各不相同的 f_m 进行调制，频率介于 100 kHz 和 250 kHz 之间。为进行三维定位，如图 29 所示，三个雷达安装在墙上。假设 (0, 0,0) 是 100 个标签的中心，则各雷达分别位于坐标 (3,1.3, −3)、(−3, 1.3, −3) 和 (0, −1.2, −3)。图

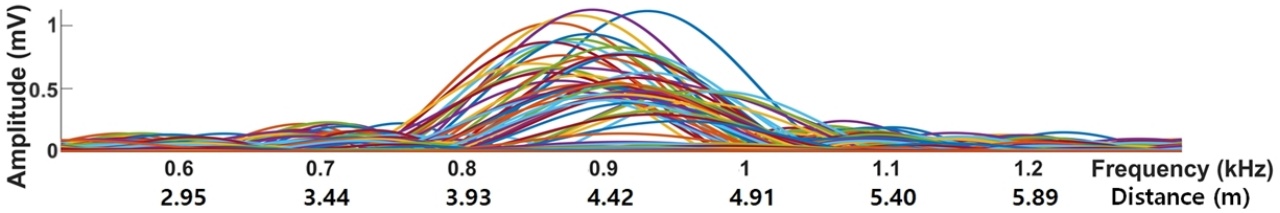


图 27: 大规模同时定位实验中 100 个标签的 sinc包络 .

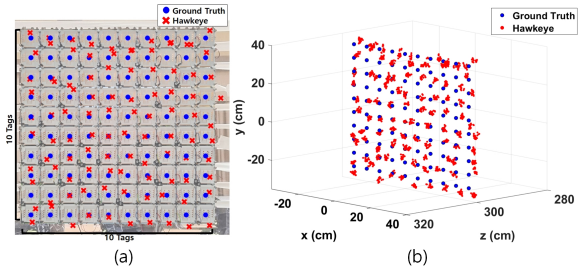


图 28: （a）将以 10×10 阵列部署在亚克力板上的 100 个标签的定位结果投影到实验照片上；（b）Hawkeye 按比例呈现的精确定位结果。

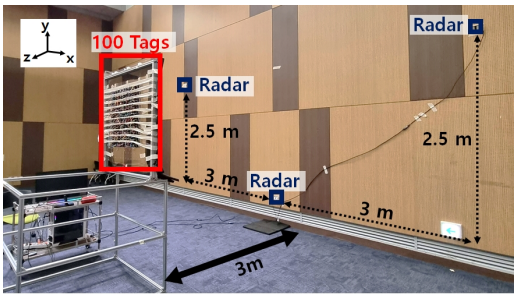


图 29：大规模同时定位的实验装置。实验在室内进行，100 个标签之间的间距为5 mm 。

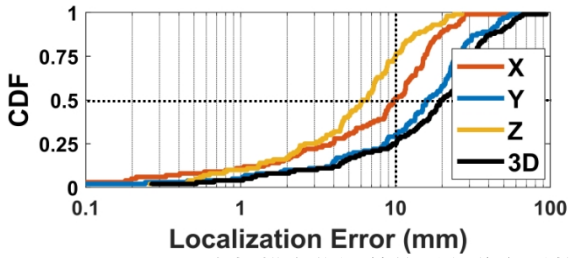


图 30：Hawkeye 大规模定位误差的累积分布函数。

27 展示了 100 个标签的定位处理结果，可以看到每个标签均成功定位，并产生了 100 条不同的包络 sinc 信号。图 28(b) 展示了 Hawkeye 在大规模场景下的定位结果，所有估计结果均以红色叉号标示在真实值附近。图 30 展示了大规模三维定位误差的累积分布函数，其中中位误差为 19.9 mm ， 90th 百分位误差为 48.4 mm。对于每个 x、 y、 z 维度，中位误差分别为 9.8 mm、 16.1 mm、 6.4 mm，而 90th 百分位误差分别为 20.5 mm、 41.1 mm、 15.5 mm 。对 100 个标签进行并发定位，验证了 Hawkeye 在实际场景下的可扩展性。

6. 相关工作

毫米波系统与感知。 毫米波系统已被提出用于利用大带宽 [26, 31,64, 12]。毫米波雷达也利用宽带宽来实现更高的感知精度 [23, 9, 52, 28]。**反向散射**。 反向散射可在功率受限场景中提供极低功耗的信号传输 [10, 16, 67,36]。反向散射系统也有助于实现低功耗感知，包括基于RFID的方法 [6, 59, 44, 30]。

反向散射/RFID定位。 作为反向散射系统的代表性实现之一，基于RFID的定位技术长期以来一直受到学界关注 [18, 20, 51, 57, 61]。早期研究测量接收信号的振幅、相位和到达角 [2, 3, 29, 65, 25, 66], , 但容易受到多径效应影响。近期研究仍因RFID带宽有限而在实际场景中精度较低，包括 [13, 58, 48, 60, 62] ，这些方法需要了解运动情况或使用参考标签来缓解多径效应。虽然 [33] 通过模拟大带宽实现了亚厘米精度，但为遵守美国联邦通信委员会法规，其距离仍仅限于房间尺度场景。[55] 利用毫米波FMCW雷达的大带宽实现 100 m 距离，但本质上仍受限于调频连续波测距分辨率。

7. 结论

本文介绍了 Hawkeye，这是一种毫米波反向散射定位系统，可在百米量程内实现亚厘米级中位数精度，同时使用价格实惠的商用雷达（~200 美元 [17]）作为读取器。Hawkeye 仅用 33.2 ms 即可同时定位 100 个标签，理论上最多可支持 1024 个标签。我们的设计包括：（i）一种新型平面范·阿塔阵列标签，可在方位角和仰角两个方向进行回射，并配有低损耗 FSK 调制器；（ii）一种新颖的定位算法，可实现 $\times 60$ 调频连续波雷达的定位性能，同时不受标签振荡器频偏影响。总的来说，Hawkeye 朝着实现大规模标签部署与定位迈出了坚实的一步。

8. 参考文献

[1] 亚德诺半导体。EVAL-TINYRAD。https://www.analog.com/en/design-center/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/eval-tinyrad.html。[2] D. Arnitz、K. Witrisal 和 U. Muehlmann。《用于无源超高频射频识别测距的多频连续波雷达方法》。*IEEE*微波理论与技术汇刊，57(5):1398–1405，2009年。[3] S. Azzouzi、M. Cremer、U. Dettmar、R. Kronberger 和 T. Knie。《采用到达角（AoA）方法定位超高频射频识别应答器的新测量结果》。载于*2011*年*IEEE*国际射频识别会议，第91–97页。IEEE，2011年。[4] M. Bouet 和 A. L. Dos Santos。《RFID标签：定位原理与定位技术》。载于*2008*年第一届*IFIP*无线日会议，第1–5页。IEEE，2008年。[5] M. Bouet 和 G. Pujolle。《基于虚拟地标的RFID标签无测距三维定位方法》。载于*2008*年*IEEE*第*19*届个人、室内和移动无线电通信国际研讨会，第1–5页。IEEE，2008年。[6] X. Chang、J. Dai、Z. Zhang、K. Zhu 和 G. Xing。《RF-RVM：利用商用现成射频识别标签持续监测呼吸量》。*IEEE*物联网期刊，8(16):12892–12901，2021年。[7] R. Chaudhuri。波与振荡。通过问题学习基础物理丛书。New Age International，2001年。[8] K. Chawla、C. McFarland、G. Robins 和 C. Shope。《利用接收信号强度实现实时射频识别定位》。载于*2013*年定位与全球导航卫星系统国际会议（*ICL-GNSS*），第1–6页。IEEE，2013年。[9] W. Chen、Y. Feng、M. Cardamis、C. Jiang、W. Song、O. Ghannoum 和 W. Hu。《利用毫米波雷达感测土壤湿度》。载于第六届*ACM*毫米波与太赫兹网络及感测系统研讨会论文集，第19–24页，2022年。[10] Z. Chi、X. Liu、W. Wang、Y. Yao 和 T. Zhu。《利用环境LTE流量实现泛在无源通信》。载于*SIGCOMM*，2020年。[11] K. M. B. 等。《OmniScatter：利用商用调频连续波雷达实现超高灵敏度毫米波反向散射》。载于*MobiSys*，2022年。[12] M. K. Haider、Y. Ghasempour、D. Koutsonikolas 和 E. W. Knightly。《Listeer：通过跟踪无线接入点的指示灯实现毫米波波束获取与转向》。载于*MobiCom*，2018年。[13] J. Han、C. Qian、X. Wang、D. Ma、J. Zhao、W. Xi、Z. Jiang 和 Z. Wang。《Twins：利用无源标签实现无设备物体跟踪》。*IEEE/ACM* 网络汇刊，24(3):1605–1617，2015年。[14] Hiwonder。H5S。https://hiwonder.hk/collections/humanoid-robot/products/h5s-hiwonder-16dof-intelligent-humanoid-dancing-robot-supports-entertaimnet-display。[15] J.-S. G. Hong 和 M. J. Lancaster。射频/微波应用微带滤波器。约翰·威立父子公司，2004年。[16] K. Huang、R. Chen 和 W. Gao。Rascatter：通过人工智能辅助功率自适应实现节能型反向散射读写器。载于*2022*年*IEEE/ACM*第七届物联网设计与实现国际会议 *(IoTDI)*，第1–13页。IEEE，2022年。[17] 英飞凌科技。DEMO DISTANCE2GO。https://www.infineon.com/cms/en/product / evaluation-boards/demo-distance2go/。[18] C. Jiang、Y. He、X. Zheng 和 Y. Liu。具备厘米级精度的方向感知 RFID 跟踪。载于*2018*年第*17*届*ACM/IEEE*传感器网络信息处理国际会议 *(IPSN)*，第290–301页。IEEE，2018年。[19] V. Kallnichev。面向移动通信的自适应天线阵列波束扫描与方向特性分析。*IEEE*天线与传播杂志，43(3):145–152，2001年。[20] N. C. Karmakar 等。无芯片 RFID 标签定位。*IEEE*微波理论与技术汇刊，61(11):4008–4017，2013年。[21] 是德科技。DSOX1204G。https://www.keysight . com/us/en/assets/7018-06411/data-sheets/5992-3484.pdf。[22] J. R. Klauder、A. C. Price、S. Darlington 和 W. J. Albersheim。线性调频雷达的理论与设计。贝尔系统技术期刊，39(4):745–808，1960年。[23] H. Kong、X.Xu、J. Yu、Q.Chen、C.Ma、Y. Chen、Y.-C. Chen 和 L. Kong。m3track：基于毫米波的多用户三维姿态跟踪。载于移动系统、应用与服务第*20*届年度国际会议论文集，第491–503页，2022年。[24] S. K. Koul 和 B. Bhat。微波与毫米波移相器，第2卷。Artech House，马萨诸塞州诺伍德，1991年。[25] R. Kronberger、T.Knie、R. Leonardi、U.Dettmar、M. Cremer 和 S. Azzouzi。基于相控阵天线的超高频 RFID 定位系统。载于*2011*年*IEEE*天线与传播国际研讨会 *(APSURSI)*，第525–528页。IEEE，2011年。

[26] J. O. Lacruz、D. Garcia、P. J. Mateo、J. Palacios 和 J. Widmer。mm-flex：用于毫米波移动全带宽实验的开放平台。载于*MobiSys*，2020。[27] 徕卡。DISTO D510。https://shop.leica-geosystems.com/sites/default/files/2020- 12/D510 792312d en.pdf。[28] H. Li、C. Xu、A. S. Rathore、Z. Li、H. Zhang、C. Song、K. Wang、L. Su、F. Lin、K. Ren 等。Vocalprint：一种基于毫米波的无中介语音感知系统，用于安全认证。*IEEE*移动计算汇刊，2021。[29] X. Li、Y. Zhang 和 M. G. Amin。RFID 标签的基于多频距离估计。载于*2009*年*IEEE RFID*国际会议，第147–154页。IEEE，2009年。[30] X.-Y. Li、M. Yin、Y. Zhang、P. Yang、C. Wan、X. Guo 和 H. Tan。Back-guard：基于无线反向散射和并行注意力模型的用户感知。*IEEE*移动计算汇刊，2022年。[31] Z. Li、Y. Shu、G. Ananthanarayanan、L. Shangguan、K. J amieson 和 P. Bahl。Spider：用于实时视频分析的多跳毫米波网络。载于*2021*年*IEEE/ACM*边缘计算研讨会 *(SEC)*，第178–191页。IEEE，2021年。[32] Z. Luo、Q. Zhang、Y. Ma、M. Singh 和 F. Adib。面向细粒度机器人技术的三维反向散射定位。载于第*16*届*USENIX*网络系统设计与实现研讨会 *(NSDI 19)*，第765–782页，2019年。[33] Y. Ma、N. Selby 和 F. Adib。关注数十亿：面向已部署 RFID 标签的超宽带定位。载于第*23*届移动计算与网络年度国际会议论文集，第248–260页，2017年。[34] Macom。IV Data Madp-000907-14020。https://tinyurl . com/bddc6ypm。[35] Macom。MADP-000907-14020。https://cdn.macom.com/datasheets/MADP-000907-14020x.pdf。[36] A. Y. Majid、M. Jansen、G. O. Delgado、K. S. Yildirim 和 P. Pawe l lzak。多跳反向散射标签间网络。载于*IEEE INFOCOM 2019-IEEE*计算机通信会议，第721–729页。IEEE，2019年。[37] G. Mao、B. Fidan 和 B. D. Anderson。无线传感器网络定位技术。计算机网络，51(10):2529–2553，2007年。[38] M. Matin 和 A. Sayeed。内嵌馈电矩形微带贴片天线的设计规则。*WSEAS*通信汇刊，9(1):63–72，2010年。[39] M. H. Mazaheri、A. Chen 和 O. Abari。mmtag：一种毫米波反向散射网络。载于 *SIGCOMM*，2021。[40] Micro Crystal。CC1V-T1A。https://www.microcrystal.com/fileadmin/Media / Products/32kHz/Datasheet/CC1V-T1A.pdf。[41] Microsemi。Libero SoC v11.8。https://www.microsemi.com/product-directory/root/5485-libero-soc-v11-8-archive。[42] R. Miesen、F. Kirsch 和 M. Vossiek。无源超高频射频识别应答器的全息定位。载于*2011*年*IEEE*国际射频识别会议，第32–37页。IEEE，2011。[43] D. L. Mills。计算机网络时间同步：网络时间协议。Taylor & Francis，第1版，2010。[44] R. Nandakumar、V. Iyer 和 S. Gollakota。亚厘米级设备的三维定位。载于*SenSys*，2018。[45] L. M. Ni、Y. Liu、Y. C. Lau 和 A. P. Patil。Landmarc：利用有源射频识别进行室内定位感知。载于第一届*IEEE*普适计算与通信国际会议论文集，*2003*年（*PerCom 2003*）。，第407–415页。IEEE，2003。[46] A. Oppenheim 和 R. Schafer。数字信号处理。Prentice Hall国际版。Prentice-Hall，1975。[47] OptiTrack。PrimeX 13。https://optitrack.com/cameras/primex-13/。[48] A. Parr、R. Miesen 和 M. Vossiek。用于移动射频识别标签定位的逆合成孔径雷达方法。载于*2013*年*IEEE*国际射频识别会议（*RFID*），第104–109页。IEEE，2013。[49] J. Reed 和 G. Wheeler。对称四端口网络的分析方法。*IRE*微波理论与技术汇刊，4(4)：246–252，1956。[50] L. Shangguan 和 K. J amieson。移动式射频识别标签分拣机器人的设计与实现。载于*MobiSys*，2016。[51] Y. Shu、P. Cheng、Y. Gu、J. Chen 和 T. He。TOC：利用充电时间定位无线可充电传感器。*ACM*传感器网络汇刊（*TOSN*），11(3)：1–22，2015。[52] X. Shuai、Y. Shen、Y. Tang、S. Shi、L. Ji 和 G. Xing。Millieye：一种用于稳健目标检测的轻量级毫米波雷达与摄像头融合系统。载于国际物联网设计与实现会议论文集，第145–157页，2021。[53] Skyworks。Si515。https://www.skyworksinc.com/- / media/Skyworks/SL/documents/public/data-sheets/Si515.pdf。[54] Soar-Xiang Tech。STMX1020-D。https://www.soared.com.tw/Content/Upload / files/micro-stage-series.pdf。

[55] E. Soltanaghaei、A. Prabhakara、A. Balanuta、M. Anderson、J. M. Rabaey、S. Kumar 和 A. Rowe。Millimetro：用于高精度远距离定位的毫米波逆反射标签。载于*MobiCom*，2021。[56] 东芝。TAR5SB33。https://toshiba.semicon-storage.com / ap-en/semiconductor/product/power-management-ics/detail.TAR5SB33.html。[57] J. Wang、F. Adib、R. Knepper、D. Katabi 和 D. Rus。RF-compass：利用射频识别标签进行机器人物体操作。载于第*19*届移动计算与网络年度国际会议论文集，第3–14页，2013。[58] J. Wang 和 D. Katabi。伙计，我的卡在哪儿？一种可在多径和非视距环境下工作的射频识别定位方法。载于*ACM SIGCOMM 2013 SIGCOMM*会议论文集，第51–62页，2013。[59] J. Wang、J. Xiong、X. Chen、H. Jiang、R. K. Balan 和 D. Fang。TagScan：利用商用射频识别设备同时进行目标成像和材料识别。载于第*23*届移动计算与网络年度国际会议论文集，第288–300页，2017。[60] L. Yang、Y. Chen、X.-Y. Li、C. Xiao、M. Li 和 Y. Liu。Tagoram：利用商用现成设备高精度实时跟踪移动射频识别标签。载于第*20*届移动计算与网络年度国际会议论文集，第237–248页，2014。[61] S. Yang、M. Jin、Y. He 和 Y. Liu。RF-Prism：通过相位解耦实现多功能的基于射频识别的感知。载于*2021 IEEE*第*41*届分布式计算系统国际会议*(ICDCS)*，第 1053–1063 页。IEEE，2021年。[62] J. Zhang、X. Liu、T. Gu、X. Tong、S. Chen 和 K. Li。SILOC：一种抗速度不一致的移动射频识别机器人定位方法。载于*IEEE INFOCOM 2021-IEEE*计算机通信会议，第 1–10 页。IEEE，2021年。[63] P. Zhang、D. Bharadia、K. Joshi 和 S. Katti。HitchHike：利用商用 WiFi 实现实用的反向散射。载于*SenSys*，2016。[64] R. Zhao、T. Woodford、T. Wei、K. Qian 和 X. Zhang。M-Cube：一种毫米波大规模多输入多输出软件无线电。载于*MobiCom*，2020年。[65] J. Zhou 和 J. Shi。射频识别定位算法及其应用——综述。《智能制造杂志》，20(6)：695–707，2009年。[66] J. Zhou、H. Zhang 和 L. Mo。利用到达角估计实现无源射频识别标签的二维定位。载于*2011 IEEE*仪器与测量技术国际会议，第 1–5 页。IEEE，2011。[67] F. Zhu、M. Ouyang、L. Feng、Y. Liu、X. Tian、M. Jin、D. Chen 和 X. Wang。实现反向散射网络的软件定义物理层。载于第*20*届移动系统、应用与服务年度国际会议论文集，第 330–342 页，2022年。