

无源反射通信 (ambient backscatter) 综述

S191000869 孙浩

2019 年 12 月 29 日

目录

1 问题描述	2
2 国内外研究现状	3
2.1 理论算法	3
2.2 传输设计	3
2.3 无源应用	4
2.4 小结	4
3 核心技术	5
4 创新点	8
参考文献	9

1 问题描述

随着科学技术的进步，越来越多的现代化设备映入人们的眼帘，如手机、电脑、平板和各式各样的 AI 设备。在这个人工智能炙手可热的时代，我们更加应该注意到数据的来源，在许多的 AI 项目中都是基于大量的数据集进行训练，然后生成特定的且适用于当前问题的模型。这庞大的数据由何而来？在未来，这些数据的大部分将会来自物联网终端设备采集到的各式各样的数据，这些数据组成一个庞大的数据集，供 AI 项目进行训练和学习。

物联网已成为智慧城市、智慧小区、智慧医疗等关系国计民生应用领域的关键组成部分。随着微处理器、无线通信以及联网技术的发展，加上各国大力推进物联网，物联网的规模在逐步扩大，当前物联网终端设备已经进入“十亿”时代，未来更将突破“百亿”级设备数量。

亿级规模的物联网时代，一方面，设备无处不在，感知物理世界并传输感知数据。另一方面，物联网设备呈现“特别小”的趋势，由此，规模特别大、设备特别小造成物联网“高密度”的特性。传统的有线接入方式根本无法实现，而无线接入方式电池储能少、电池维护成本高，很难提供持续的数据感知传输服务。因此，数据的感知传输需求与低功耗设计之间的矛盾日益凸显。

近年来，超低功耗无源反射通信技术脱颖而出，成为物联网终端设备低功耗传输的有力的解决方案。无源反射通信由激励源、反射设备（称该类设备为无源 tag 或简称 tag）以及接收端构成。采用无源反射通信技术的 tag 本身不生成射频信号，而是通过调制并反射其他设备的射频信号，达到数据传输的目的。由于无需功耗高的射频前端，其数据传输的功耗通常在微瓦级，为 WiFi 等传统无线传输技术功耗的几千分之一。

根据激励源是否为专用设备，反射通信通常分为专用反射通信（类似射频识别技术，需要部署专用的射频设备生成激励源为无源 tag 提供能量源和载波）和环境反射通信。2013 年，华盛顿大学团队提出了“ambient backscatter”环境反射通信技术，该技术借用环境中已经存在的如电视广播、WiFi、ZigBee、蓝牙等射频（Radio frequency, RF）信号，无需部署专用的射频终端设备提供激励源，因此显著降低了成本与复杂度。且由于环境信号的普适性、tag 的易部署性，借用式环境反射通信技术具有“即插即用”的特点。

然而，借用式反射完全依赖于主动通信中的信号状态，若主动通信处于空闲状态，反射通信将失效，无法工作。此外，由于功耗的限制，tag 无法感知/控制主动通信的信号模式，造成主被动通信不协同问题，为无源反射通信的设计带来了更大的挑战。此综述以物联网应用为背景，研究当下无源反射通信的新技术

2 国内外研究现状

针对无源反射通信,国内外一些研究组已经围绕基础理论算法、传输设计和应用等方面开展了大量的研究。

2.1 理论算法

文献 [1] 提出了利用环境中正交频分复用信号 (OFDM, orthogonal frequency division multiplexing) 的空中调制技术,该技术通过是否改变 OFDM 符号的状态来实现传输 0 和 1,例如传输 1 时,在单个 OFDM 符号中间进行状态转换,而传输 0 时,状态不变。文献 [2] 评价了使用曼切斯特编码和差分曼斯编码的半相干解调及非相干解调的性能。文献 [3, 4] 假设激励信号为持续的正弦白载波,推导了反射通信的信道容量与中断概率函数,并建立了相应仿真实验验证理论结果。文献 [5] 推导了信源取值为实数条件下的中断概率函数,为系统的理论误码率提供了一定的参考,然而,由于信源实数的限制,该结果具有一定的局限性。

文献 [6] 通过建立相应的理论模型分析了环境反射通信系统对主动通信系统的干扰情况。文献 [7] 将环境反射技术引入到设备-设备 (D2D, device-to-device) 通信中,并考虑环境因素,分析了系统的覆盖率、吞吐量等性能。文献 [8] 从主动通信性能和被动通信两个方面分析了采用环境反射技术的整个系统的性能,指出了激励源和接收机为同一个设备时性能会有所提升。文献 [9] 在采用环境反射技术的物联网中,建立了以传输速率为目标的资源调度联合优化框架,包括时间和能量的调度,并评价了系统的中断概率性能指标。

2.2 传输设计

与传统通信网络不同,反射通信受激励信号的能量限制,呈现以能量为中心的组网特点,因此传统的传输协议并不适合反射通信。文献 [10] 提出了一种链路层协议,通过比特率和信道调节来最大化通信带宽。麻省大学阿默斯特分校研究团队提出了一套相对完整的协议栈 QuarkNet。通过引入分片机制,将反射网络协议栈分解成最小的原子单位,即比特,使数据传输适应节点能量的变化。

华盛顿大学团队提出了环境反射通信框架并设计了相应的协议栈和原型系统,该系统能够利用环境 TV 及移动通信信号进行反射通信,在传输距离约 0.8 米条件下达到 1kbps 的传输速率,证明了环境 RF 信号不仅能够提供能量,同时可被用来进行反射通信,从而开启了环境反射通信的新方向。近年多篇文献研究了基于普适 WiFi 信号的反射通信系统。设计专用的 WiFi AP 与 tag,利用多进制调制,实现高速 WiFi 反射通信,但只能实现在 2 米的通信距离下达到 1kbps 的传输速率。文献 [11] 提出了 Passive Wi-Fi,利用标签将激励信号中的连续波变换到另一个频段,从而消除了自干扰,有利于扩大反向散射范围。

Zhang 等在文献 [12] 中提出了码字转换 (codeword translation) 技术, 使得反射后的信号依然在 WiFi 的码本簿中, 从而商用 WiFi 路由器能够解码 tag 反射信号, 并将该信号扩展到了蓝牙、ZigBee 等信号框架下 [12], 建立了 FreeRider 系统, 具有很好的普适性, 在 WiFi 反射通信框架下, 在 WiFi 信道空闲时, 通过注入 WiFi 伪数据包, 提高充电和数据传输效率。此外, 文献 [13, 14, 15] 研究了基于其它形式的环境信号的反射通信系统, 例如 FM 广播信号 [13]、LoRa 信号 [14, 15] 等。

X-Tandem 系统 [16] 通过移频, 实现了 tag 的多跳传输。而在实现多个 tag 并行反射通信方面, FlipTracer[17] 提出了并行解码方法, 利用信号的稳定过渡模式来实现在恶劣环境下的可靠解码; 文献 [18] 基于 OFDMA 将 tag 分配在不同的子载波上, 实现了 48 个 tag 的并行反射通信; 而 Netscatter[19] 采用分布式啁啾扩频调制技术实现了理论最高 256 个设备的并发通信, 然而其通信距离非常短且速率非常低。

2.3 无源应用

近年来, 一些研究组提出了基于无源发射通信的应用, 例如无源电话 [20] 实现了基站与无源手机间的语音传输; 无源视频传输 [21] 实现了基于无源反射通信的视频传输, 构建了像素的原型系统; Living IoT[22] 将设备放置在蜜蜂身上, 检测了农场中各点的温湿度信息。此外, 无源反射通信还可以应用在穿戴和植入设备、超低功耗无线传输以及下一代传感器传输中。

不足点: (1) 未建立主动通信信道的流量、能量随机等条件限制下的反射通信网络传输优化框架, 提升系统性能, 以及容量分析理论; (2) 针对不同类型的物联网感知数据, 未提出相应的调度算法, 使得数据流和能量流匹配。

2.4 小结

综上所述, 目前制约借用式环境反射通信实际部署的重要因素之一是: 缺乏对主动通信链路的认知能力、不同场景下的适应能力, 以及面对不同感知任务的调度能力。因此, 本课题从研究 WiFi 激励源的特性入手, 构建场景自适应的反射通信理论模型及相应的技术, 实现持续、稳定、高效的反射通信, 为差异化的物联网感知任务提供可靠传输服务, 突破物联网传输与功耗之间的矛盾问题, 以期应用到实际物联网中, 获得经济效益。

3 核心技术

由于是借用环境中已经存在的如 TV 广播、WiFi、ZigBee 等射频信号，无需部署专门的射频终端设备提供激励源，但是环境中的射频信号不可控，如何设计一个鲁棒性很强的系统成为一个技术瓶颈。Ambient backscatter (AB) 和 RFID 不同，首先，AB 利用环境中已存在的射频信号，不需要部署有特殊功能基础设施，如 RFID 阅读器，来发送高功率的信号来驱动附近的设备，其次，AB 提供设备到设备的通信，而传统的 RFID 系统 Tag 必须和 Reader 通信以此来与周围的设备进行交互，由于“中间商”的存在，导致要求的功率高，通信实时性和效率低。

文献 [23] 利用环境中存在的 TV 信号实现 Ambient backscatter (AB)，存在三个挑战，首先环境中的信号是随机的且不可控制的，要从这紊乱的信号中提取出 AB 信息是不容易的。其次，因为没有电池，在解码接收信息时会受到功率的 γ 严重限制。最后，由于没有中心控制器协调通信，终端设备需要运行分布式多路访问协议。对于这些挑战，可以通过一下关键技术解决。

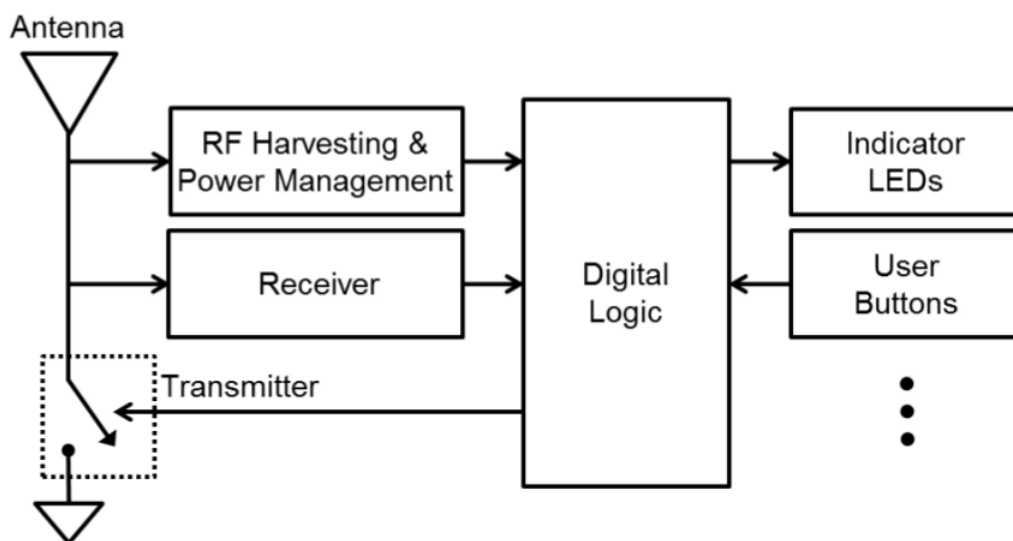


图 1: Ambient backscatter 框图

图 1中包含发送器，接收器和收集器，因为它们都是使用环境中的射频信号，所以它们连接在一个天线上。发送器和接收器通过调制环境中的射频信号来通信，收集器从环境中的射频信号提取能量供系统运行，且它们是相互独立的运行，但是当发送器运行时，接收器和收集器

只能捕获很少的一部分信号。

假设数字接收器以电视信号的奈奎斯特信息速率对接收的信号进行采样，接收到的样本是 $y[n]$ ，然后可以表示为电视信号的带宽和散射信号。

$$y[n] = x[n] + \alpha B[n]x[n] + w[n]$$

$x[n]$ 表示接收到的电视信号， $w[n]$ 表示噪音， α 表示相对于电视信号的反向散射信号的复数衰减，而 $B[n]$ 是反向散射发射器发射的比特。由于接收器以电视信号奈奎斯特速率采样，因此 $x[n]$ 中的相邻采样不想管。现在如果反向散射信息是速率的一小部分，则 $B[Ni + j]s$ 对于 $j = 1$ 到 N 都相等。如果 N 个接收器采样中的平均瞬时功率等于单个反向散射电路的比特，我们可以得到

$$\frac{1}{N} |y[n]|^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x[n] + \alpha Bx[n] + w[n]|^2$$

B 只能取 0 或者 1。由于电视信号 $x[n]$ 与噪声 $w[n]$ 不相关，我们可以将上式重写为：

$$\frac{1}{N} |y[n]|^2 = \frac{|1+\alpha B|^2}{N} \sum_{i=1}^N |x[n]|^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |w[n]|^2$$

P 是接收到的电视信号的平均功率， $P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x[n]|^2$ 。忽略噪音的影响，当发送器处于反射和非反射状态时，接收器的平均功率分别是 $|1 + \alpha|^2$ 和 P 。接收器可以区分 $|1 + \alpha|^2$ 和 P 这两个功率，然后解码数据。因此，无论电视信号是否有变化，接收器都可以对接收到的信号进行正确解码。

以上都是假设接收机可以获取数字采样样本，并且可以在其上执行诸如平均和比较功率电平之类的操作。然而获取数字样本需要模数转换器 (ADC)，但 ADC 需要大量的功率，显然在 Ambient backscatter 中应该避免使用 ADC，我们可以通过选择适当的模拟电路拓扑来模拟硬件中的操作。如图 2 所示，接收器通过两步来模拟硬件中的操作，首先是包络检测，使电视信号变得平滑。其次是计算阈值电路，在两个电平之间产生阈值，比较器将平均包络信号和阈值进行比较以产生输出位。

包络检测阶段，该电路使用包络检波器和 RC (电阻/电容) 电路实现，平滑或者平均电视信号的自然变化。如图 2 所示，它由两个简单的硬件组成：一个二极管和一个电容器 $C1$ ，并且通过两个串联电阻 $R1$ 和 $R2$ 的稳定电路。首先二极管起单向阀的作用，允许电流沿一个方向流动，但不允许另一方向流动，电容器是电荷存储元件，电阻器调节电流流动。在该电路中，只要输入电压大于电容器上的电压，二极管就会提供电荷。在输入低于电容器上的电压的时间段内，二极管不提供电荷，并且电阻器慢慢耗散电容器上存储的能量，从而降低了电压。电压下降的速率大致由乘积 $C1(R1 + R2)$ 决定。因此，通过平衡 $R1$ 和 $R2$ 的值与二极管的有效电阻并选择适当的电容，所示电路可以充当低通滤波器，对 TV 信号中的快速自然变化求平均，但保留缓慢变化的反向散射位。

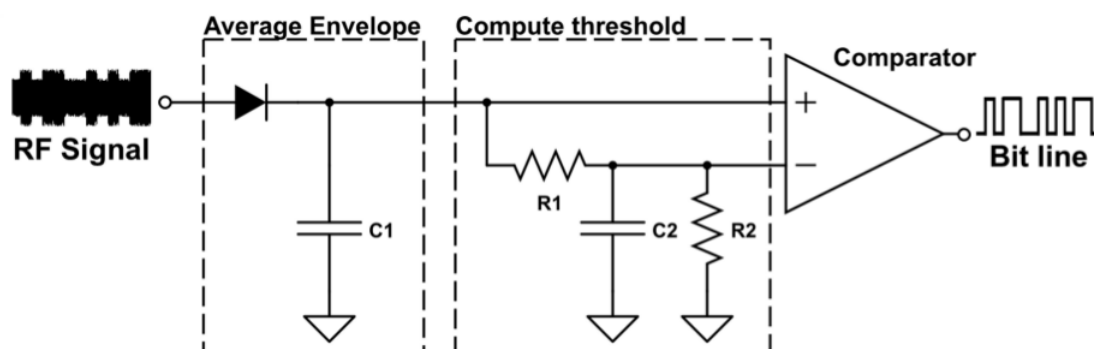


图 2: 模拟电路拓扑

计算阈值阶段，平均电路的输出产生两个信号电平，分别对应于‘0’和‘1’位。原则上，具有 ADC 的接收器可以通过处理数字样本来区分两个信号电平。具体来说，假设我们有两个电压不同的信号 V_0 和 V_1 ， $V_1 > V_0$ ，其中 V_0 和 V_1 对应于零位和一位的功率电平。为了区分它们，接收器将首先计算一个阈值，该阈值是两个信号电平的平均值，即 $\frac{V_0+V_1}{2}$ 。当接收信号大于此阈值时，我们得出结论，接收信号为 V_1 。；否则，我们得出结论，接收信号为 V_0 。

由于我们选择消除完整的 ADC 来降低功耗，因此接收器使用模拟硬件来模仿此操作。图 2 示出了比较电路所使用的硬件元件。它由一个 RC 电路和一个比较器组成。 RC 电路重新使用两个电阻器 R_1 和 R_2 ，并添加一个电容器 C_2 进行进一步平均，从而产生接近 $\frac{V_0+V_1}{2}$ 的阈值。比较器将两个电压值作为输入，并产生一个 1 或一个零以指示两个值中较大的一个。比较器的第一个输入是我们的平均包络电路的输出，第二个输入是阈值。

我们注意到原型的比特率决定了 RC 电路元件的值选择（例如，工作在 10kbps 的接收机要求的 RC 值不同于 1kbps 的 RC 值）。这是因为，在较低速率下，每个位在通道上占用更多时间，因此需要更多平均才能正确计算阈值。

最终，虽然理论上我们可以通过足够的平均值来区分任意两个功率电平，但是每个比较器都带有一个最小间隙，在这个最小间隙之下它无法区分两个功率电平。此间隙确定两个设备可以相互通信的最大距离。

4 创新点

如上所述，物联网终端设备已经进入亿级规模，大量的终端设备产生数据，构成大量的数据集，而这些成为了 AI 的训练集最直接的数据来源。未来人工智能要落地，基于目前已经产生的数据集来训练和学习是无法满足人工智能的需求的，需要获得实时的最新的数据，边训练边学习，使人工智能具有学习和进步的功能才能真正讲人工智能落实，而这些的基础都需要获取实时且精确的数据级——物联网终端设备产生的实时数据必定是不二之选。所以未来，会有大量的物联网终端设备，如果在这些终端设别可以实现无源工作，将会对社会和人类产生巨大的贡献，而未来环境中必定存在大量且复杂的信号，如 WiFi 信号，4G 信号,5G 信号和 TV 信号等，Ambient backscatter 将有可能利用这些信号实现物联网终端设别无源工作。

其次在一些特殊的环境下，面对如此庞大数量的终端设备，采用有线接入或者电池功能是不现实的，而 Ambient backscatter 恰好适应于超低功耗传输，如在天气极端的地方，如南极，北极和一些极热的地方，使用无源反射通信可以大大减少成本，和实现“即插即用”的特点。

参考文献

- [1] Gang Yang, Ying-Chang Liang, Rui Zhang, and Yiyang Pei. Modulation in the air: Backscatter communication over ambient ofdm carrier. *IEEE Transactions on Communications*, 66(3):1219–1233, 2017.
- [2] Qin Tao, Caijun Zhong, Hai Lin, and Zhaoyang Zhang. Symbol detection of ambient backscatter systems with manchester coding. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 17(6):4028–4038, 2018.
- [3] Wenjing Zhao, Gongpu Wang, Rongfei Fan, Li-Sheng Fan, and Saman Atapattu. Ambient backscatter communication systems: Capacity and outage performance analysis. *IEEE Access*, 6:22695–22704, 2018.
- [4] Wenjing Zhao, Gongpu Wang, Feifei Gao, Yulong Zou, and Saman Atapattu. Channel capacity and lower bound for ambient backscatter communication systems. In *2017 9th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, pages 1–6. IEEE, 2017.
- [5] Yu Zhang, Jing Qian, Feifei Gao, and Gongpu Wang. Outage probability for ambient backscatter system with real source. In *2017 IEEE 18th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, pages 1–5. IEEE, 2017.
- [6] Chen Chen, Gongpu Wang, Yanwen Wang, and Quan Miao. Interference analysis of ambient backscatter on existing wireless communication systems. In *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pages 1–5. IEEE, 2017.
- [7] Xiao Lu, Hai Jiang, Dusit Niyato, Dong In Kim, and Zhu Han. Wireless-powered device-to-device communications with ambient backscattering: Performance modeling and analysis. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 17(3):1528–1544, 2017.
- [8] Donatella Darsena, Giacinto Gelli, and Francesco Verde. Modeling and performance analysis of wireless networks with ambient backscatter devices. *IEEE Transactions on Communications*, 65(4):1797–1814, 2017.
- [9] Xiaolan Liu, Yue Gao, and Fengye Hu. Optimal time scheduling scheme for wireless powered ambient backscatter communications in iot networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(2):2264–2272, 2018.

- [10] Pengyu Zhang, Jeremy Gummesson, and Deepak Ganesan. Blink: A high throughput link layer for backscatter communication. In *Proceedings of the 10th international conference on Mobile systems, applications, and services*, pages 99–112. ACM, 2012.
- [11] Bryce Kellogg, Vamsi Talla, Shyamnath Gollakota, and Joshua R Smith. Passive wi-fi: Bringing low power to wi-fi transmissions. In *13th {USENIX} Symposium on Networked Systems Design and Implementation ({NSDI} 16)*, pages 151–164, 2016.
- [12] Pengyu Zhang, Colleen Josephson, Dinesh Bharadia, and Sachin Katti. Freerider: Backscatter communication using commodity radios. In *Proceedings of the 13th International Conference on emerging Networking EXperiments and Technologies*, pages 389–401. ACM, 2017.
- [13] Anran Wang, Vikram Iyer, Vamsi Talla, Joshua R Smith, and Shyamnath Gollakota. {FM} backscatter: Enabling connected cities and smart fabrics. In *14th {USENIX} Symposium on Networked Systems Design and Implementation ({NSDI} 17)*, pages 243–258, 2017.
- [14] Ambuj Varshney, Oliver Harms, Carlos Pérez-Penichet, Christian Rohner, Frederik Hermans, and Thiemo Voigt. Lorea: A backscatter architecture that achieves a long communication range. In *Proceedings of the 15th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems*, page 18. ACM, 2017.
- [15] Yao Peng, Longfei Shangguan, Yue Hu, Yujie Qian, Xianshang Lin, Xiaojiang Chen, Dingyi Fang, and Kyle Jamieson. Plora: A passive long-range data network from ambient lora transmissions. In *Proceedings of the 2018 Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication*, pages 147–160. ACM, 2018.
- [16] Jia Zhao, Wei Gong, and Jiangchuan Liu. X-tandem: Towards multi-hop backscatter communication with commodity wifi. In *Proceedings of the 24th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pages 497–511. ACM, 2018.
- [17] Meng Jin, Yuan He, Xin Meng, Yilun Zheng, Dingyi Fang, and Xiaojiang Chen. Fliptracer: Practical parallel decoding for backscatter communication. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 27(1):330–343, 2019.
- [18] Renjie Zhao, Fengyuan Zhu, Yuda Feng, Siyuan Peng, Xiaohua Tian, Hui Yu, and Xinbing Wang. Ofdma-enabled wi-fi backscatter. In *The 25th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pages 1–15. ACM, 2019.

- [19] Mehrdad Hesar, Ali Najafi, and Shyamnath Gollakota. Netscatter: Enabling large-scale backscatter networks. In *NSDI*, pages 271–284, 2019.
- [20] Vamsi Talla, Bryce Kellogg, Shyamnath Gollakota, and Joshua R Smith. Battery-free cellphone. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 1(2):25, 2017.
- [21] Mehrdad Hesar, Saman Naderiparizi, Ye Wang, Ali Saffari, Shyamnath Gollakota, and Joshua R Smith. Wireless video streaming for ultra-low-power cameras. In *Proceedings of the 16th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, pages 536–536. ACM, 2018.
- [22] Vikram Iyer, Rajalakshmi Nandakumar, Anran Wang, Sawyer B Fuller, and Shyamnath Gollakota. Living iot: A flying wireless platform on live insects. In *The 25th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pages 1–15. ACM, 2019.
- [23] Vincent Liu, Aaron Parks, Vamsi Talla, Shyamnath Gollakota, David Wetherall, and Joshua R Smith. Ambient backscatter: wireless communication out of thin air. In *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, volume 43, pages 39–50. ACM, 2013.