

让[0,1]调制实现背向散射：IPSC架构破解6G智联网的能耗瓶颈

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/42769.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

让[0,1]调制实现背向散射：IPSC架构破解6G智联网的能耗瓶颈。

华中科技大学江涛教授研究团队在中国工程院院刊Engineering发表[0,1] Modulated Backscatter with Lower-Power Integration of Sensing and Communication for I-IoE in 6G的研究型论文。该研究提出了一种从{0,1}调制向[0,1]调制跨越的联合无源传感与通信（IPSC）架构，构建了支撑复杂环境下高精度传感与远距离传输的物理通信机制。研究围绕电压频率转换硬件设计、智能特征提取算法以及宽带连续频分多址（cFDMA）多址接入等关键技术展开深入探索，旨在解决现有无源背向散射系统中特殊场景下标签难以更换、传输速率低以及通信距离短等核心技术难题，为构建万物智联（I-IoE）网络提供系统性理论支撑与技术路径。

无源物联网的演进：从免维护到长距离通信，为何难以突破瓶颈？

无源背向散射技术正面向极低功耗物联网需求持续演进。目前许多研究（如FreeRider系统）成功利用现有的商业射频技术（如WiFi、ZigBee和Bluetooth）实现了背向散射通信，相当于在现有的无线电波上以顺风车的方式搭载信息。然而，这种模式在实际应用中面临着显著的技术瓶颈。

在可植入医疗设备或危险环境等特殊应用场景中，由于环境封闭且复杂，要求系统具备极高的免维护性，传统标签的定期更换或重新部署成为一项重大挑战。同时，传统的数字{0,1}调制机制就像一个只能开或关的开关，难以连续、精准地映射环境传感数据的细微变化。具有实际应用价值的智能物联网节点，必须能够在免电池维护的前提下，实现动态信道下长距离、高可靠度的传感数据传输与解码。

[0,1]调制：打破数字标签的二元枷锁

要理解这项技术的精妙之处，首先需要了解限制传统背向散射标签的一个枷锁——纯数字的调制离散性。为了打破这一限制，研究团队创新性地提出了一种基于[0,1]调制（[0,1] modulation）的调控机制。团队并未采用传统的纯数字编码芯片，而是将电压-频率转换（VFC）机制深植于硬件设计之中。

具体而言，研究人员利用6MHz晶体振荡器和电压频率转换器（AD7441）构建了调制模块。这相当于在传感器感知真实世界（如温度、压力带来的电压变化）与射频前端之间，建立了一个连续的频率映射空间。通过方波驱动射频前端，系统能够将连续的模拟信号直接转化为频率变化。这种机制打破了传统数字标签{0,1}的二元限制，使得标签能够通过[0,1]调制的方式将感知到的环境

特征精准地散射出去，赋予了系统实现联合无源传感与通信（IPSC）的物理基础。

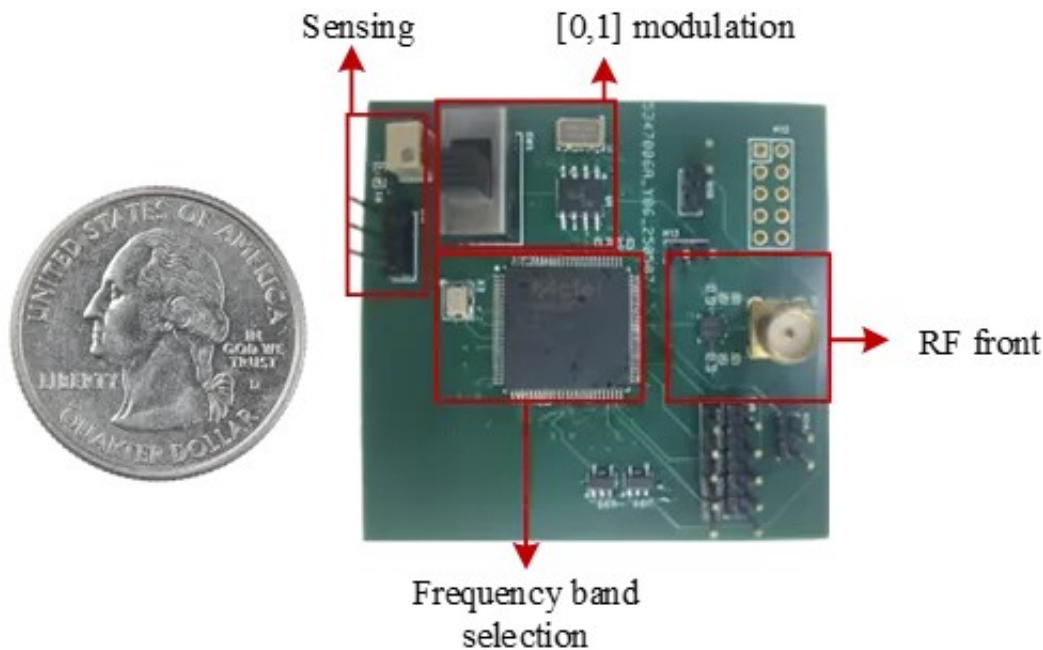


图1.基于频率选择的[0,1]调制背向散射标签硬件原型

为什么[0,1]调制比传统调制更适应动态环境？

物联网扩展的核心，在于对复杂多变环境的高效适应。传统的背向散射在面对室内走廊或室外等不同环境时，极易因信道动态变化而产生数据误读。

研究团队通过实验验证了这一新架构的可行性与优越性。基于设计的离散密码本（discrete code book）和智能检测算法，团队成功在高达30米的范围内，实现了超过 18.2 kbps 的吞吐量性能。更重要的是，针对动态信道带来的预测不准问题，团队引入了强大的机器学习增强策略。实验结果显示，相较于随机森林（random forest）等模型存在的偏差（其缺乏充分利用特征交互的增强机制），引入目标特征设计与稳健的增强策略（如LightGBM）后，系统有效解决了误解的核心来源，大幅提升了环境状态感知的准确性和稳定性。这表明：通过模拟调制结合智能算法，系统在维持低功耗的同时，实现了极高的信号还原完整性。

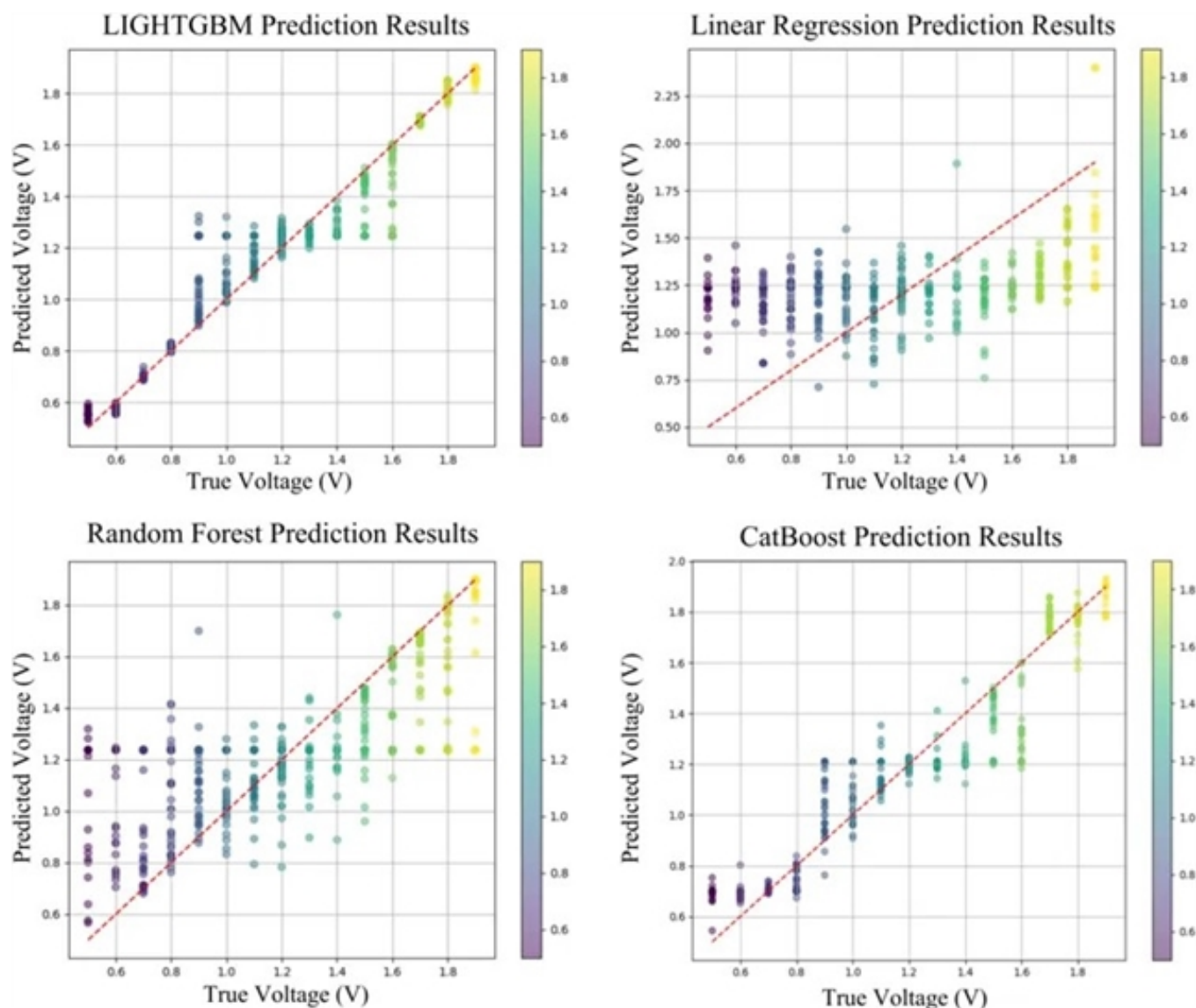


图2.不同模型回归性能比较（LightGBM、线性回归、随机森林与CatBoost预测结果）

从实验室到广阔天地：IPSC的挑战与未来发展趋势

在验证单标签30米范围内实现稳定通信的基础上，研究团队进一步拓展了该技术的应用边界。这项技术的真正价值在于其对未来大规模无源物联网的惊人扩展能力与工程化潜力。

首先是对多节点接入能力的深度挖掘。为了探究系统的网络并发极限，团队开发了一种宽带cFDMA算法。仿真实验证实，该多址接入方法能够有效管理庞大的设备群，系统完全有潜力同时容纳超过150个标签的并发接入，彻底解决了大规模部署时的冲突问题。

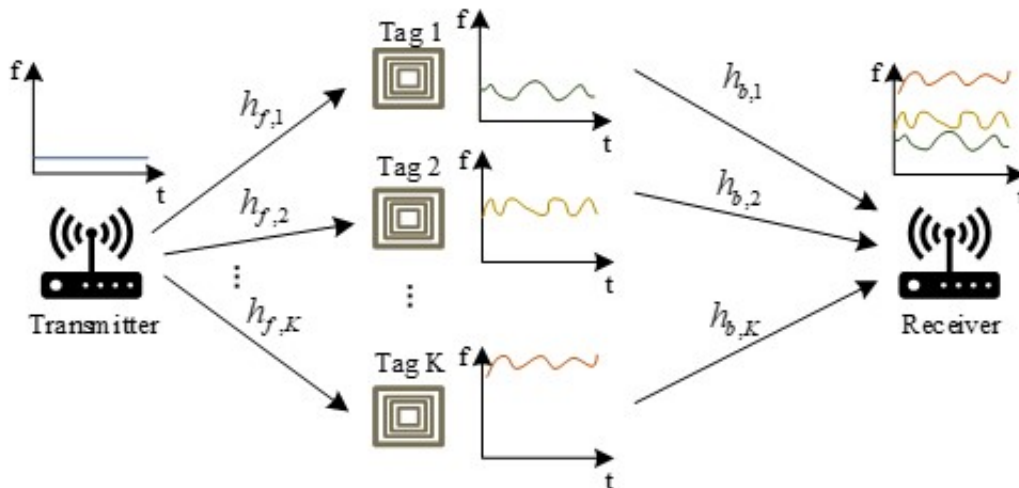


图3.提出的cFDMA算法设计原理

其次是直击未来工程实施的痛点。研究团队客观地指出，目前的硬件架构依然存在优化空间。在未来的系统部署中，通过专用集成电路（ASIC）设计，有望将标签尺寸缩小至1cm²以下，进一步降低单个标签的功耗和成本。此外，面对需要极高传输速率的语音传输（麦克风声音频率转电压输出），该系统也展现出了在长距离、高可靠性音频信号调制解调上的探索潜力，为环境监测、灾害预警和物流跟踪等场景描绘了广阔的应用蓝图。

本文弥补了传统数字背向散射标签在细粒度传感和复杂环境适应性上的缺点，通过引入[0,1]调制与电压-频率映射机制，赋予了无源标签高精度连续感知的通信能力，成功实现了从单一通信到联合无源传感与通信（IPSC）的物理跨越。

实验充分验证了该机制的可靠性。系统不仅在30米范围内实现了超18.2 kbps的吞吐量，更通过结合智能检测算法与离散数据集，在室内外动态信道中保持了极高的环境状态感知准确率。

面向未来的万物智联网络，该策略通过宽带cFDMA算法天然缓解了海量设备接入的碰撞问题（支持超150个标签并发）。尽管当前原型在走向微型化时仍需ASIC设计的加持，且高频动态信号（如语音）的传输仍是挑战，但其展现出的软硬件协同创新，为下一代低功耗、免维护、大容量的无源物联网节点交互构筑了一条极具价值的新路径。（来源：EngineeringJournals微信公众号）

相关论文信息：<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809926000433>

作者：江涛等 来源：《工程》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发