

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108010

利用 Wi-Fi 信道的超低功耗无线传感系统*

冯笑晨, 邵 壮, 文玉梅, 李 平, 王 遥
(上海交通大学电子信息与电气工程学院 上海 200240)

摘要: 现有的无线传感系统的传感节点需要主动发射射频电磁波进行数据传输, 功耗高; 利用反向散射调制的无源无线传感系统需要高成本专用阅读器, 应用受限。针对上述问题, 本文提出利用 Wi-Fi 信道的无线传感系统, 用反向散射调制将传感数据调制于 Wi-Fi 设备发射的信号中, 影响 Wi-Fi 信道参数。使用 Wi-Fi 接收设备获取信道状态信息, 通过支持向量机训练识别传感数据的检测器, 实现无需专用阅读器的超低功耗无线传感系统。用路由器、无线网卡、传感节点搭建无线温度传感系统, 传感节点最高功耗不超过 350 μW , 安装无线网卡的 Wi-Fi 接收设备可读取传感节点距路由器 5 m 内, 以 200 bit/s 速率传输的传感数据。该系统为智能家居、可穿戴设备等应用的超低功耗无线传感需求提供了有效解决方案。

关键词: 无线传感; 反向散射调制; Wi-Fi; 信道状态信息

中图分类号: TH89 TN926 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

An ultra-low-power wireless sensor system using Wi-Fi channels

Feng Xiaochen, Shao Zhuang, Wen Yumei, Li Ping, Wang Yao

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The sensor nodes of existing wireless sensor systems require actively generated radio frequency electromagnetic waves for data transmission, which leads to high power consumption. Passive wireless sensor systems that use backscattering modulation technology require high-cost dedicated readers, which results in limited applications. To solve these problems, this article proposes an ultra-low-power wireless sensor system that manipulates the Wi-Fi channels. The designed system modulates the sensing data into the signals transmitted by the Wi-Fi device using backscattering modulation, which affects the parameters of the Wi-Fi channels. The system achieves ultra-low-power wireless sensing without a dedicated reader by using a Wi-Fi receiving device to obtain channel state information and training a machine learning detector capable of demodulating sensing data through the support vector machine. The wireless temperature sensing system is established using a router, a wireless network card, and a wireless sensor node. The maximum power consumption of the wireless sensor node is less than 350 μW . The Wi-Fi receiving device that employs a wireless network card can read the sensing data transmitted at 200 bit/s when the wireless sensor node is within 5 m of the router. The system provides an effective solution and satisfies the demand for ultra-low-power wireless sensors in smart homes, wearable devices, and other applications.

Keywords: wireless sensing; backscattering modulation; Wi-Fi; channel state information

0 引 言

无线传感技术使传感器信号发送摆脱了线缆的束缚, 有效的克服了有线传感器在部署和维护上的困难, 在物联网领域具有广泛的应用前景^[1]。无线传感技术中的传感节点包含传感单元, 信号采集与处理单元和通信单

元, 相比于通信单元, 传感单元和信号采集与处理单元的功耗几乎可以忽略^[2]。无线传感节点的功耗限制了自身的寿命和功能, 降低通信单元的功耗成为无线传感技术面临的主要挑战之一^[3]。目前无线传感节点的通信单元大多采用 Bluetooth^[4-5]、ZigBee^[6-7]、Wi-Fi^[8-9] 等无线通信技术, 需要产生和发射射频载波以传输传感数据, 造成通信单元的功耗较大, 一般都在毫瓦到数十毫瓦量级^[10],

收稿日期: 2021-05-28 Received Date: 2021-05-28

* 基金项目: 国家自然科学基金(61973217)项目资助

依赖于使用体积和容量有限的电池供电的有源无线传感节点,导致无线传感技术因传感节点需要周期性更换电池而难以被大规模部署和长期持续使用。

为解决无线传感技术面临的能量问题,使用太阳能^[11]、风能^[12]、振动能^[13]等环境能量收集技术的自供电无线传感节点有效缓解了电池维护对传感节点的限制。但由于环境能量的不连续性和不稳定性,采用环境能量收集技术的无线传感节点难以实现稳定工作,如使用太阳能或风能作为能量来源的传感节点无法部署在无光或无风区域;振动能的能量密度通常较低,难以在支撑传感功能的同时支撑传感数据的无线传输。此外,采用环境能量收集技术的有源无线传感节点的大部分能量由通信单元消耗,传感单元可消耗的能量极为有限,进而导致传感功能和性能参数受到限制。

与射频识别技术(radio frequency identification, RFID)类似的、无需传感节点主动产生射频载波的无源无线传感技术成为解决能量问题的另一可行方法。这种技术的传感节点通过反向散射将传感数据调制到由专用阅读器提供的射频电磁波上,使得传感节点的通信单元功耗大幅降低。2008年华盛顿大学将RFID技术与无线传感技术结合,开发了无线识别与感知平台(wireless identification and sensing platform, WISP),通过专用的阅读器提供射频电磁波和反向散射调制技术实现了传感节点处微瓦级的数据传输功耗^[14]。在此基础上,结合RFID技术的无源无线传感节点被应用于如温度^[15]、湿度^[16]、磁场强度^[17]、电缆电流^[18]等各类传感任务中,但由于这种技术需要成本高且技术复杂的专用阅读器,其应用通常限制于工业、农业等专用场景中,难以推广到人体健康检测、智能家居等领域。

随着Wi-Fi技术的快速普及,如个人电脑、智能手机、路由器等Wi-Fi设备在各种生产生活场景中随处可见,Wi-Fi信号应该可以成为无源无线传感技术中代替专用射频电磁波的能量和信息载体。斯坦福大学提出的高吞吐量Wi-Fi反向散射技术(high throughput Wi-Fi backscatter, BackFi)将Wi-Fi与RFID中的反向散射技术结合^[19],用改造的Wi-Fi设备代替了专用阅读器。由于Wi-Fi信号是已被调制的射频信号,具有20 MHz以上的带宽,难以直接替代专用阅读器提供的窄带射频电磁波,BackFi需要对Wi-Fi设备进行硬件修改,不能直接采用商用的Wi-Fi设备。近年来,利用Wi-Fi提供的信道状态信息(channel state information, CSI)完成无线传感任务的Wi-Fi传感技术无需修改Wi-Fi设备硬件,通过Wi-Fi设备从Wi-Fi信号中提取并处理细粒度的CSI,实现了室内定位^[20]、手势识别^[21]、呼吸估计^[22]等精细目标的检测与识别。然而,由于传感对象受限于对Wi-Fi信道产生影响的被测量,Wi-Fi传感技术目前只能用于感知对象空间位置的变化。

本文提出利用Wi-Fi信道的无线传感系统,通过反向散射影响Wi-Fi信道参数,将无线传感节点的传感数据调制到反向散射的Wi-Fi信号上,从Wi-Fi设备获取的CSI中识别出反向散射Wi-Fi信号中的传感数据,实现微瓦级功耗的无线数据传输。系统仅使用通用的Wi-Fi网络架构,并且无需对Wi-Fi设备进行任何硬件修改,不依赖于专用的阅读器;利用Wi-Fi物理层中的状态参数实现数据传输,不影响Wi-Fi网络正常通信。

1 系统原理

1.1 反向散射调制

传感节点的反向散射调制原理如图1所示,调制电路由射频开关和负载阻抗组成。射频开关根据传感节点编码后的传感数据中每个码元对应的符号 $b_n (n = 1, 2, \dots, N)$,选择负载阻抗 $Z_{LOAD,n} (n = 1, 2, \dots, N)$ 以改变天线雷达截面,使得天线反向散射不同量的入射射频电磁波,实现 N 进制传感数据调制。

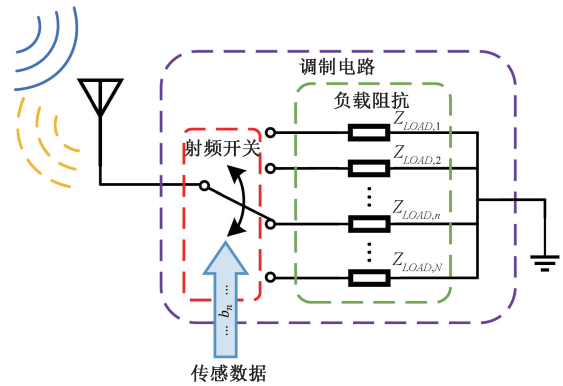


图1 反向散射调制原理

Fig. 1 The principle of backscattering modulation

天线反向散射等效电路如图2所示,其中天线阻抗 $Z_{ant} = R_{ant} + jX_{ant}$,当射频开关选择负载阻抗 $Z_{LOAD,n}$ 时,天线雷达截面 A_s 可表示为^[23]:

$$A_s = \frac{\lambda^2 G_{tag}^2 R_{ant}^2}{\pi |Z_{ant} + Z_{LOAD,n}|^2} \quad (1)$$

其中, λ 是入射射频电磁波的波长; G_{tag} 是传感节点的天线增益。天线反向散射的射频电磁波功率 P_s 可表示为:

$$P_s = A_s S = \frac{\lambda^2 G_{tag}^2 S}{4\pi} |1 - \Gamma_{LOAD,n}|^2 \quad (2)$$

其中, S 是入射射频电磁波的有效功率通量密度,

$\Gamma_{LOAD,n} = \frac{Z_{LOAD,n} - Z_{ant}^*}{Z_{LOAD,n} + Z_{ant}}$ 表示负载阻抗 $Z_{LOAD,n}$ 对应的反向散

射系数。天线的有效接收面积 A_e 可表示为:

$$A_e = \frac{P_e}{S} = \frac{\lambda^2 G_{tag}}{4\pi} \quad (3)$$

其中, P_e 是天线接收的射频电磁波功率。联立式(2)和(3),可得:

$$P_s = G_{tag} |1 - \Gamma_{LOAD,n}|^2 P_e \quad (4)$$

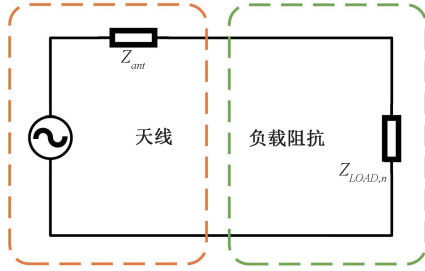


图 2 天线反向散射等效电路

Fig. 2 The equivalent circuit of antenna backscattering

因此,当射频开关选择不同的负载阻抗,天线将对入射的射频信号 $s(t)$ 产生不同程度的反向散射,反向散射信号 $a(t)$ 取决于 G_{tag} 和 $\Gamma_{LOAD,n}$ 。由于在反向散射过程中 G_{tag} 不发生改变, $\Gamma_{LOAD,n}$ 取决于负载阻抗 $Z_{LOAD,n}$, 对应于传感节点传输的符号 b_n 。因此,设反向散射效率为 $\eta(b_n)$, 有:

$$a(t) = \eta(b_n) s(t) \quad (5)$$

传感节点可根据式(4)选择 N 个合适的负载阻抗 $Z_{LOAD,n}$, 通过式(5)将传感数据调制于反向散射的 Wi-Fi 信号中,实现 N 进制传感数据传输。

1.2 系统组成

利用 Wi-Fi 信道的超低功耗无线传感系统组成如图 3 所示,系统包括 Wi-Fi 发射节点、传感节点和 Wi-Fi 接收节点 3 个部分。Wi-Fi 发射节点和 Wi-Fi 接收节点可使用无线路由器、计算机、手机等任意 Wi-Fi 设备。其中,Wi-Fi 发射节点用于提供 Wi-Fi 信号;传感节点搭载各类传感器获取传感数据,并通过反向散射调制电路将传感数据调制到 Wi-Fi 信号上;Wi-Fi 接收节点根据接收的 Wi-Fi 信号获取估计 Wi-Fi 信道的 CSI,并从中识别传感节点传输的传感数据。Wi-Fi 信道可分为 Wi-Fi 发射节点与接收节点之间不受传感节点影响的环境 Wi-Fi 信道 r , Wi-Fi 发射节点至传感节点的前向 Wi-Fi 信道 k , 和传感节点至 Wi-Fi 接收节点的后向 Wi-Fi 信道 g 。

Wi-Fi 网络以数据包为传输单位进行数据交互,Wi-Fi 发射节点在发送第 n_{pkg} 个数据包时,向周围环境发射 Wi-Fi 信号 $x_{n_{pkg}}(t)$ 。传感节点处的 Wi-Fi 信号 $s_{n_{pkg}}(t)$ 可表示为:

$$s_{n_{pkg}}(t) = k_{n_{pkg}}(t) * x_{n_{pkg}}(t) \quad (6)$$

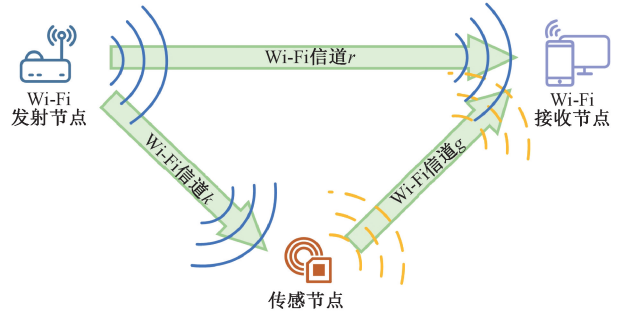


图 3 系统组成

Fig. 3 The composition of the system

其中, $k_{n_{pkg}}(t)$ 为第 n_{pkg} 个数据包传输时间内,前向 Wi-Fi 信道 k 的冲激响应。传感节点将传感数据反向散射调制于 $x_{n_{pkg}}(t)$ 中,调制后的反向散射 Wi-Fi 信号 $a_{n_{pkg}}(t) = \eta(b_n) s_{n_{pkg}}(t)$ 。Wi-Fi 接收节点同时接收到来自 Wi-Fi 发射节点的 Wi-Fi 信号与传感节点的反向散射 Wi-Fi 信号,Wi-Fi 接收节点接收的 Wi-Fi 信号 $y_{n_{pkg}}(t)$ 可表示为:

$$y_{n_{pkg}}(t) = r_{n_{pkg}}(t) * x_{n_{pkg}}(t) + g_{n_{pkg}}(t) * a_{n_{pkg}}(t) + n(t) \quad (7)$$

其中, $r_{n_{pkg}}(t)$ 和 $g_{n_{pkg}}(t)$ 分别为第 n_{pkg} 个数据包传输时间内,环境 Wi-Fi 信道 r 和后向 Wi-Fi 信道 g 的冲激响应, $n(t)$ 为加性白噪声, $y_{n_{pkg}}(t)$ 可进一步表示为:

$$y_{n_{pkg}}(t) = h_{n_{pkg}}(t, b_n) * x_{n_{pkg}}(t) + n(t) \quad (8)$$

$$h_{n_{pkg}}(t, b_n) = r_{n_{pkg}}(t) + \eta(b_n) g_{n_{pkg}}(t) * k_{n_{pkg}}(t) \quad (9)$$

由式(8)可知,在每个 Wi-Fi 数据包传输时间内,传感节点传输符号 b_n , 在 Wi-Fi 接收节点处对应信道冲激响应 $h_{n_{pkg}}(t, b_n)$, 因此对于反向散射 Wi-Fi 信号中的传感数据,可以通过估计 Wi-Fi 信道进行识别。

1.3 信道估计

根据 1.2 节,Wi-Fi 接收节点可以通过估计 Wi-Fi 信道识别传感节点传输的传感数据。为提高通信质量,各类采用正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 的 Wi-Fi 协议均有提供信道估计,使得 Wi-Fi 设备能够根据估计结果进行动态调整,适应当前信道状态。

协议规定每个数据包前含有预定义的长训练序列 (long training sequence field, LTF), 可用于估计 Wi-Fi 信道。在发送第 n_{pkg} 个数据包内的第 n_{LTF} 个训练符号时,发射的 Wi-Fi 信号可表示为 $x_{n_{LTF}, n_{pkg}}(t)$, 由式(8)可得,接收的 Wi-Fi 信号 $y_{n_{LTF}, n_{pkg}}(t) = h_{n_{pkg}}(t, b_n) * x_{n_{LTF}, n_{pkg}}(t) + n(t)$ 。对等式两端进行傅里叶变换得:

$$Y_{n_{LTF}, n_{pkg}}(f) = H_{n_{pkg}}(f) X_{n_{LTF}, n_{pkg}}(f) + N(f) \quad (10)$$

其中, $H_{n_{pkg}}(f)$ 为信道频率响应,与 $h_{n_{pkg}}(t, b_n)$ 互为

傅里叶变换对。对于第 k 个 Wi-Fi 填充子载波, 频率为 f_k , 由式(10) 估计 $H_{n_{pkg}}(f_k)$:

$$\hat{H}_{n_{pkg}}(f_k) = \frac{Y_{n_{LTF}, n_{pkg}}(f_k)}{X_{n_{LTF}, n_{pkg}}(f_k)} \quad (11)$$

其中, $\hat{H}_{n_{pkg}}(f_k)$ 是 $H_{n_{pkg}}(f_k)$ 的估计值, 表示第 n_{pkg} 个数据包传输时间内第 k 个填充子载波频率上的信道频率响应。对于有 N_{RX} 个接收天线, N_{TX} 个发射天线的 Wi-Fi 通信系统, 信道频率响应可进一步表示为 $\hat{H}_{pkg}(f_k)$:

$$\hat{H}_{pkg}(f_k) = \begin{bmatrix} \hat{H}_{n_{pkg}}^{1,1,k}(f_k) & \hat{H}_{n_{pkg}}^{1,2,k}(f_k) & \cdots & \hat{H}_{n_{pkg}}^{1,N_{TX},k}(f_k) \\ \hat{H}_{n_{pkg}}^{2,1,k}(f_k) & \hat{H}_{n_{pkg}}^{2,2,k}(f_k) & \cdots & \hat{H}_{n_{pkg}}^{2,N_{TX},k}(f_k) \\ \vdots & \vdots & \hat{H}_{n_{pkg}}^{i,j,k}(f_k) & \vdots \\ \hat{H}_{n_{pkg}}^{N_{RX},1,k}(f_k) & \hat{H}_{n_{pkg}}^{N_{RX},2,k}(f_k) & \cdots & \hat{H}_{n_{pkg}}^{N_{RX},N_{TX},k}(f_k) \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中, $\hat{H}_{n_{pkg}}^{i,j,k}(f_k)$ 表示第 n_{pkg} 个数据包传输时间内, 第 i 个接收天线与第 j 个发射天线间在第 k 个填充子载波频率上的信道频率响应, 即 CSI。因此 Wi-Fi 发射节点每发送一个数据包, 若当前 Wi-Fi 协议下的填充子载波个数为 N_k , Wi-Fi 接收节点能够获取一个 $N_{RX} \times N_{TX} \times N_k$ 的三维 CSI 矩阵。此矩阵表示该数据包传输时间内的信道频率响应, 受传感节点传输的符号 b_n 影响, 可用于识别传感节点传输的传感数据。

1.4 传输性能分析

由 1.3 节可知, Wi-Fi 接收节点根据接收的 Wi-Fi 信号实现对信道的估计, 对于 Wi-Fi 接收节点处接收的 Wi-Fi 信号功率 P_{re} , 有:

$$P_{re} = P_{tr-re} + P_{s-re} + P_n \quad (13)$$

其中, P_{tr-re} , P_{s-re} , 和 P_n 分别为 Wi-Fi 接收节点处接收的来自 Wi-Fi 发射节点的 Wi-Fi 信号功率, 来自传感节点反向散射的 Wi-Fi 信号功率, 和噪声功率。对于传感系统, P_{s-re} 是包含传感信息的有用信号, 可得系统的信

噪比 $SNR_{sys} = \frac{P_{s-re}}{P_{tr-re} + P_n}$, 并用其衡量系统的传输性能。

SNR_{sys} 可进一步表示为:

$$SNR_{sys} = \frac{P_{s-re}}{P_{tr-re}} (1 + (SNR_{wi})^{-1})^{-1} \quad (14)$$

其中, $SNR_{wi} = \frac{P_{tr-re}}{P_n}$ 表示 Wi-Fi 发射节点与接收节点之间 Wi-Fi 通信的信噪比。根据 Friis 传输公式, 有:

$$P_{tr-re} = \frac{\lambda^2 P_{tr} G_{tr} G_{re}}{(4\pi d)^2} \quad (15)$$

$$P_{s-re} = \frac{\lambda^2 P_s G_{re}}{(4\pi d_r)^2} \quad (16)$$

$$P_e = \frac{\lambda^2 P_{tr} G_{tr} G_{tag}}{(4\pi d_s)^2} \quad (17)$$

其中, P_{tr} 为 Wi-Fi 发射节点的发射功率, d 为 Wi-Fi 发射节点与接收节点间的距离, d_s , d_r 分别为传感节点与 Wi-Fi 发射节点和 Wi-Fi 接收节点间的距离, G_{tr} , G_{re} 分别为 Wi-Fi 发射节点和 Wi-Fi 接收节点的天线增益。联立式(4), 有:

$$SNR_{sys} = \left(\frac{\lambda G_{tag}}{4\pi} |1 - \Gamma_{LOAD,n}| \right)^2 (1 + (SNR_{wi})^{-1})^{-1} \left(\frac{d}{d_s d_r} \right)^2 \quad (18)$$

由于系统在实际应用时, Wi-Fi 发射节点通常距离传感节点较远, Wi-Fi 接收节点距离传感节点较近, 可以认为 $d_s \approx d$, 式(18) 可进一步表示为:

$$SNR_{sys} = \left(\frac{\lambda G_{tag}}{4\pi} |1 - \Gamma_{LOAD,n}| \right)^2 (1 + (SNR_{wi})^{-1})^{-1} (d_r)^{-2} \quad (19)$$

可知在传感节点的天线增益和负载阻抗确定后, 系统的传输性能受 SNR_{wi} 和 d_r 影响。由于 Wi-Fi 发射节点和接收节点之间能够进行正常的 Wi-Fi 通信是系统工作的前提, SNR_{wi} 对 SNR_{sys} 的影响是有限的, 因此系统的传输性能主要由 d_r 决定, 并且系统的信噪比 SNR_{sys} 与 d_r^2 呈反比例关系。

2 系统实现

2.1 工作流程

系统工作流程如图 4 所示, 系统的工作状态由 Wi-Fi 接收节点控制。当有传感任务时, Wi-Fi 接收节点通过 Wi-Fi 发射节点定期发送的信标帧请求与 Wi-Fi 发射节点进行 Wi-Fi 互联。互联后, Wi-Fi 接收节点向 Wi-Fi 发射节点连续发送数据包, 作为启动请求告知 Wi-Fi 发射节点进入工作状态, 同时该连续的数据包将激活传感节点, 告知传感节点从休眠模式进入工作模式, 进行传感数据的采集。随后 Wi-Fi 发射节点向 Wi-Fi 接收节点连续发送数据包, 传感节点将传感数据反向散射调制到 Wi-Fi 信号中, Wi-Fi 接收节点从接收到的数据包中提取 CSI 矩阵, 用以识别传感数据。

由于系统在不同的环境中具有不同的初始 Wi-Fi 信道状态, 传感节点在每次传输传感数据前需要传输一段前导序列, Wi-Fi 接收节点根据已知的前导序列训练识别传输符号 b_n 的检测器。系统数据传输结构如图 5 所示, 前导序列由多个训练序列构成, 每个训练序列包含一组传感节点可传输的 N 种符号 b_n 。在前导序列后传输传感节点获取的传感数据, 其中 q_l ($l = 1, 2, \dots, L$) 是传感数据编码后的第 l 个码元。Wi-Fi 接收节点利用在前导序

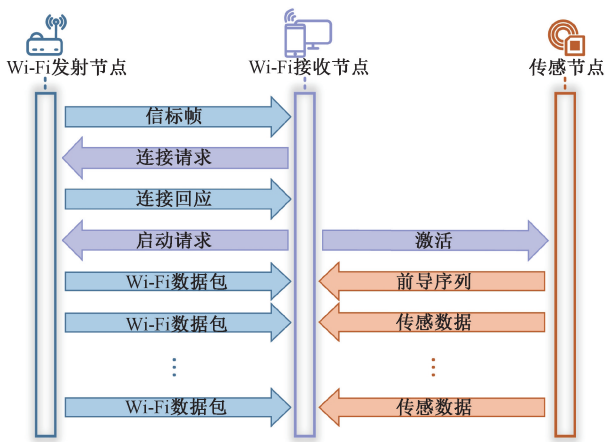


图 4 系统工作流程

Fig. 4 The workflow of the system

列传输时间内获取的 CSI 矩阵训练检测器,将 q_l 传输时间内获取的 CSI 矩阵作为检测器的输入, b_n 作为检测器的输出,实现传感数据的识别。

2.2 传感节点

传感节点的组成如图 6 所示,包括天线、电源、激活电路、微处理器 (microcontroller unit, MCU)、传感器和调制电路。当无传感任务时,传感节点处于休眠模式,MCU 处于低功耗模式。当 Wi-Fi 接收节点发送连续的数据包激活传感节点时,激活电路将输出高电平唤醒 MCU,使传感节点进入工作模式。MCU 被唤醒后,控制传感器工作,通过模/数转换器 (analog to digital converter, ADC) 采集传感数据,并将传感数据编码。调制电路通过改变天线雷达截面,将编码后的传感数据反向散射调制于环境 Wi-Fi 信号中。

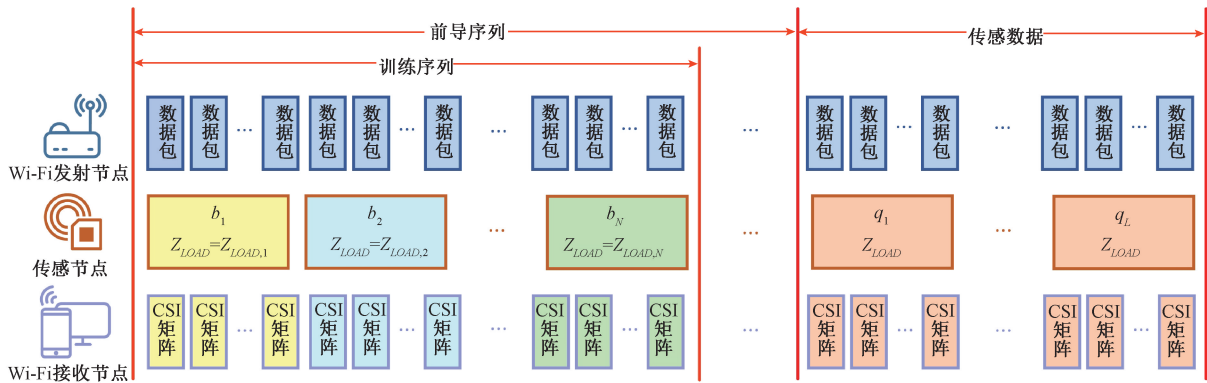


图 5 系统数据传输结构

Fig. 5 The data transmission structure of the system

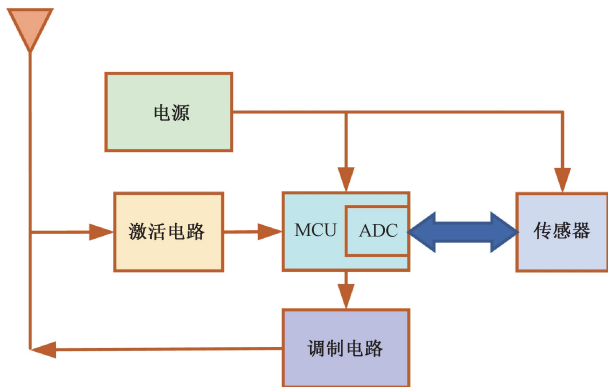


图 6 传感节点框图

Fig. 6 The block diagram of the sensor node

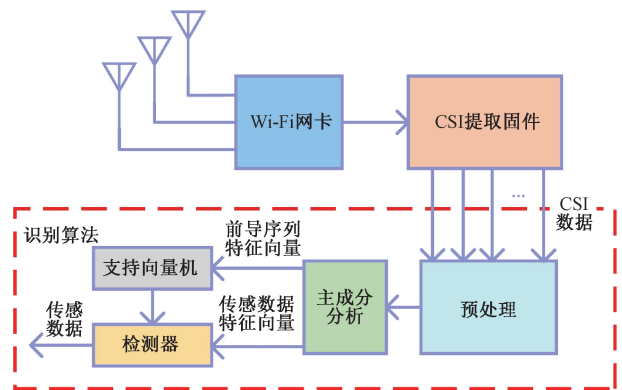


图 7 传感数据解调原理框图

Fig. 7 The block diagram of sensing data demodulation

2.3 Wi-Fi 接收节点

Wi-Fi 接收节点中传感数据的解调原理如图 7 所示,由天线、Wi-Fi 网卡、CSI 提取固件和识别算法组成。

CSI 提取固件可从 Wi-Fi 网卡接收到的每个数据包

中获取一个如式(12)所示的 $N_{RX} \times N_{TX} \times N_k$ 的三维 CSI 矩阵。因此,传感节点每次传输完成后,Wi-Fi 接收节点可获取 $N_{RX} \times N_{TX} \times N_k$ 个子载波 CSI 数据流 $s_{i,j,k}[t]$:

$$s_{i,j,k}[t] = \sum_{n_{pkg}=1}^m \hat{h}_{i,j,k}^{n_{pkg}} \delta(t - t_{n_{pkg}}),$$

$$t = t_1, t_2, \dots, t_{n_{pkg}}, \dots, t_m \quad (20)$$

其中, m 是接收到的数据包个数, $t_{n_{pkg}}$ 是第 n_{pkg} 个数据包的到达时间, 可由每个数据包的时间戳获取。由于 Wi-Fi 网络传输存在时延抖动和丢包, 接收到的 CSI 数据流并不是时间上的均匀采样。为了进行后续的数据处理, 需要对 $s_{i,j,k}[t]$ 进行重采样, 将不稳定的采样时间间隔 $\Delta t_{n_{pkg}} = t_{n_{pkg}} - t_{n_{pkg}-1}$ 变为常数。对 $s_{i,j,k}[t]$ 中 m 个数据点 $(t_{n_{pkg}}, s_{i,j,k}[t_{n_{pkg}}])$ 进行插值, 得到插值函数 $\hat{s}_{i,j,k}(t)$, 有:

$$\hat{s}_{i,j,k}(t_{n_{pkg}}) = s_{i,j,k}[t_{n_{pkg}}], n_{pkg} = 1, \dots, m \quad (21)$$

以 $T_s = \frac{t_m - t_1}{m - 1}$ 的采样间隔对 $\hat{s}_{i,j,k}(t)$ 进行采样, 得到

具有均匀采样间隔 T_s 的 CSI 数据流 $\hat{s}_{i,j,k}[n]$:

$$\hat{s}_{i,j,k}[n] = \hat{s}_{i,j,k}(t_1 + nT_s), n = 0, 1, \dots, m - 1 \quad (22)$$

$\hat{s}_{i,j,k}[n]$ 反应了传感节点传输时间内的 Wi-Fi 信道, 但影响信道的因素不止有传感节点的反向散射状态, 还有室内环境的变化。为提取 $\hat{s}_{i,j,k}[n]$ 中只反映传感节点反向散射状态的信息, 需要去除表征室内环境变化的趋势项。室内环境中, 影响 Wi-Fi 信道的主要因素为室内物体的移动, 802.11n 协议假定室内物体移动速度不超过 1.2 km/h, 由其引起的多普勒频移在 2.45 GHz 频段下不超过 3 Hz, 5 GHz 频段下不超过 6 Hz。因此可以通过数字低通滤波器 $h_{lpf}[n]$ 提取趋势项 $\hat{s}_{i,j,k}^{trend}[n]$, 并从 $\hat{s}_{i,j,k}[n]$ 中去除, 得到反映传感节点反向散射状态的 CSI 数据流 $\hat{s}_{i,j,k}^{bs}[n]$:

$$\hat{s}_{i,j,k}^{trend}[n] = \hat{s}_{i,j,k}[n] * h_{lpf}[n] \quad (23)$$

$$\hat{s}_{i,j,k}^{bs}[n] = \hat{s}_{i,j,k}[n] - \hat{s}_{i,j,k}^{trend}[n] \quad (24)$$

由式 (11) 可知, 信道估计过程忽略了噪声项的影响, $\hat{s}_{i,j,k}^{bs}[n]$ 中还含有白噪声。假设传感节点每次传输一个码元用时 T_{bs} , 则 $\hat{s}_{i,j,k}^{bs}[n]$ 中每 $M = \left\lfloor \frac{T_{bs}}{T_s} \right\rfloor$ 个采样点表示一个传感节点传输的码元。为滤除白噪声, 并减少采样点数以减少计算量与数据冗余, 将 $\hat{s}_{i,j,k}^{bs}[n]$ 通过 M 倍均值抽取滤波器:

$$w_{i,j,k}[n] = \sum_{b=0}^{M-1} \hat{s}_{i,j,k}^{bs}[nM - b] h_{arr}[M - 1 - b] \quad (25)$$

$$h_{arr}[n] = \frac{1}{M}, n = 0, 1, \dots, M - 1 \quad (26)$$

其中, $h_{arr}[n]$ 为 $M - 1$ 阶均值滤波器, $w_{i,j,k}[n]$ 表示传感节点传输的第 n 个码元对应的去除趋势项与白噪声后的第 i 个接收天线与第 j 个发射天线间第 k 个子载波的 CSI。如图 8 所示, 经过上述预处理后, 传感节点每传输一个码元, Wi-Fi 接收节点能够获取一个三维矩阵 $\mathbf{W}[n]$, 每个矩阵含有 $N_{RX} \times N_{TX} \times N_k$ 个元素 $w_{i,j,k}[n]$ 。

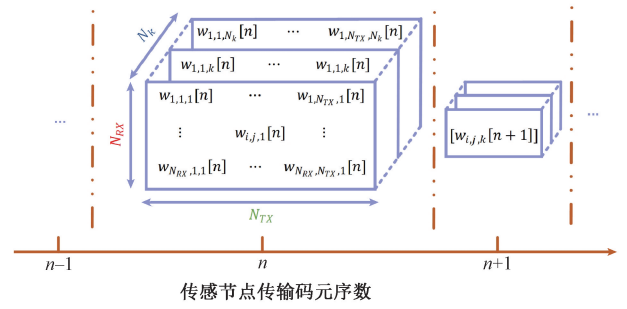


图 8 预处理后 Wi-Fi 接收节点获取的 \mathbf{W} 矩阵

Fig. 8 The \mathbf{W} matrix obtained from the Wi-Fi receiving node after preprocessing

由于传感节点的反向散射状态对各条 Wi-Fi 信道的影响是不确定的, 每个 \mathbf{W} 矩阵中的元素相当于 $N_{RX} \times N_{TX} \times N_k$ 个不同的传感器同时测量当前传感节点反向散射状态所获得的测量结果, 其中只有部分测量结果能够分辨传感节点传输不同符号时对应的反向散射状态。为了提高后续利用测量结果检测符号的准确度, 需要滤除不能分辨传感节点反向散射状态的测量结果, 同时合并相关性较强的测量结果。采用主成分分析 (principal component analysis, PCA) 的方法, 对 $N_{RX} \times N_{TX} \times N_k$ 个测量结果进行数据融合, 得到 P 个相互独立且最能够分辨节点反向散射状态的测量结果, 即将 $N_{RX} \times N_{TX} \times N_k$ 的 $\mathbf{W}[n]$ 矩阵降维至含有 P 个元素的向量 $\mathbf{w}_p[n]$:

$$\mathbf{w}_p[n] = \text{PCA}(w_{1,1,1}[n], \dots, w_{i,j,k}[n], \dots, w_{N_{RX}, N_{TX}, N_k}[n], P) \quad (27)$$

把 $\mathbf{w}_p[n]$ 中的 P 个元素作为传感节点传输的第 n 个码元的 P 个特征, $\mathbf{w}_p[n]$ 即为该码元的特征向量。将从前导序列中已知的训练符号及其对应的特征向量作为学习样本, 通过支持向量机 (support vector machine, SVM) 训练用于传感数据符号检测的检测器。传感数据的每个特征向量作为检测器的输入, 符号作为检测器的输出。因此, Wi-Fi 接收节点通过将获取的每个特征向量 $\mathbf{w}_p[n]$ 输入由前导序列训练的检测器, 输出传感节点传输的每个码元对应的符号, 实现传感数据的解调。

3 实验与分析

3.1 实验平台

为了评估所提出的无线传感系统的有效性和性能, 选择不具有特殊性的办公室环境中开展实验。搭建的实验平台如图 9 所示, Wi-Fi 发射节点与传感节点距离 d_s , Wi-Fi 接收节点与传感节点距离 d_r , Wi-Fi 发射节点与接收节点距离 $d = d_s + d_r$ 。其中, Wi-Fi 发射节点采用 Wi-Fi 路由器开发板 JS7628 (支持 802.11n 协议), Wi-Fi 接收节点为配置有 Intel 5300 网卡 (支持 802.11n 协议)

和 CSI 提取固件 CSIttools^[24] 的计算机。实现了 2.2 节中的传感节点,其中,MCU 采用低功耗、内置 12 位 ADC 与温度传感器的 MSP430;射频开关采用具有高隔离度和低

插入损耗的 ADG919,配置 0 Ω 与 50 Ω 负载阻抗,实现二进制传感数据调制;天线使用 3 dBi Wi-Fi 全向天线,电源和激活电路分别使用电池和轻触开关。

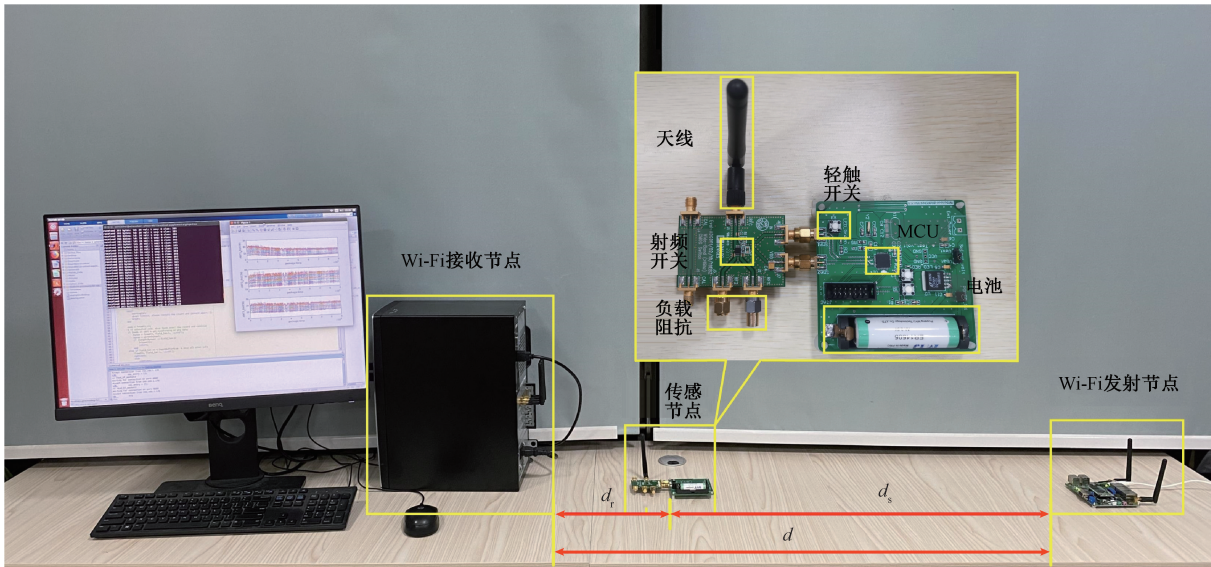


图 9 实验平台

Fig. 9 The experiment platform

3.2 传感应用

为验证系统能够应用于实际的传感任务,搭建无线温度传感系统。设置 $d_s = 5\text{ m}$, $d_r = 10\text{ cm}$, 在距离传感节点 10 cm 处放置温度可控的恒温热源,用于改变环境温度。使用通过线缆连接至数字万用表 (Keithley 2002, Tektronix) 的 PT100 热电阻紧贴传感节点,将从数字万用表读取的温度测量结果作为当前环境温度的约定真值。同时,系统通过传感节点中 MSP430 内部温度传感器对当前环境温度进行测量,从 Wi-Fi 接收节点中识别温度传感数据,并将其作为当前环境温度的测量值。Wi-Fi 接收节点获取的 CSI 数据流 $s_{i,j,k}[t]$ 如图 10 所示,训练序列包含一组“1,0”比特,表示传感节点传输的两种符号;前导序列由 18 个训练序列构成,用于根据 2.3 节的识别算法训练识别温度传感数据的检测器。

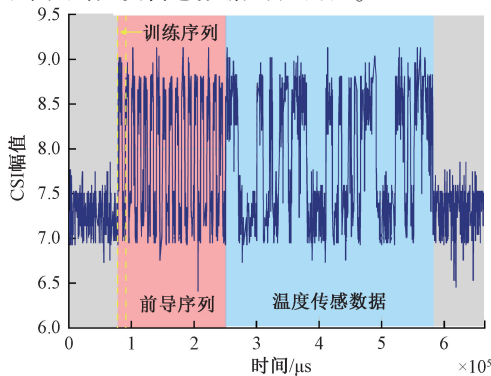


图 10 CSI 数据流

Fig. 10 CSI data stream

图 11 显示了系统测量温度与环境温度之间的关系,在 25℃ ~ 100℃ 的测量范围内绝对误差小于 $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 。根据技术手册, MSP430 内部温度传感器的测量绝对误差为 $\pm 3^\circ\text{C}$,系统的温度测量结果在其误差允许范围内,验证了系统能够令传感器在无线测量中达到应有的传感性能,完成实际的传感任务。相比于现有 Wi-Fi 传感技术局限于空间位置量的感知,系统能够直接应用现有低功耗传感器,实现对温度等难以引起 Wi-Fi 信道显著变化的被测量的无线传感。

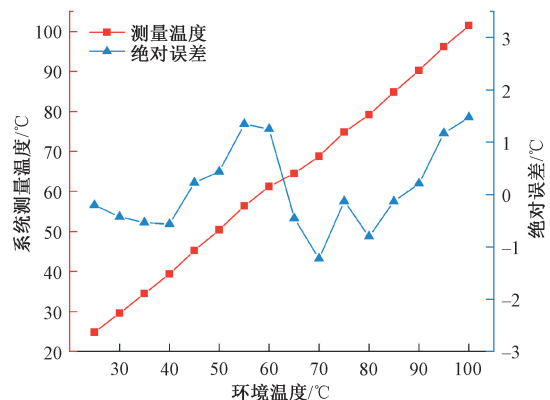


图 11 温度测量结果

Fig. 11 Temperature measurement results

3.3 功耗测试

无线传感节点的功耗是重要的性能指标,过高的功耗将增大传感节点周期性更换电池导致的维护成本,使

其难以被大规模部署和长期持续使用。由于系统进行数据传输时传感节点无需发射射频电磁波,传感节点的传输速率不影响传感节点的功耗。以 200 bit/s 的传输速率为例,利用精密电源/测量单元(B2901 A, keysight technologies)为传感节点提供 2.5 V 电压,测量传感节点在环境温度 25℃ 下进行温度传感任务时各个模块的功耗。首先测量传感节点中温度传感器的功耗,当 MCU 正常工作并使能温度传感器时,传感节点功耗为 267.25 μW ;当 MCU 正常工作并关闭温度传感器时,传感节点功耗为 264.92 μW ,因此温度传感器在环境温度 25℃ 下的功耗为 2.33 μW 。随后测量传感节点从休眠至完成温度传感任务时的总功耗,测量结果如图 12 所示,传感节点在休眠模式下功耗约为 1 μW ;进入工作模式后,MCU 使能温度传感器与 ADC 进行温度测量,功耗约为 305 μW ;随后 MCU 关闭温度传感器与 ADC,对温度传感数据进行编码,功耗约为 265 μW ;最后 MCU 使能调制电路,进行温度传感数据传输,功耗在 267 μW 左右。除去 MCU 正常工作占用的功耗,调制电路的功耗仅为 2 μW 左右。结果表明传感节点主要的能量消耗来源于 MCU 及其内置的 ADC,通信单元的功耗远小于信号采集与处理单元,与传感单元功耗相当,工作模式下传感节点的总功耗不超过 350 μW ,远低于采用蓝牙、Zigbee、Wi-Fi 等无线通信技术的无线传感节点。

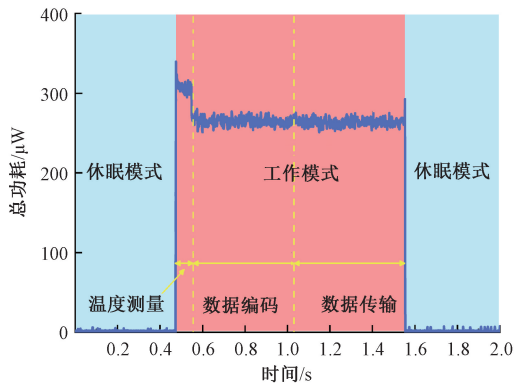


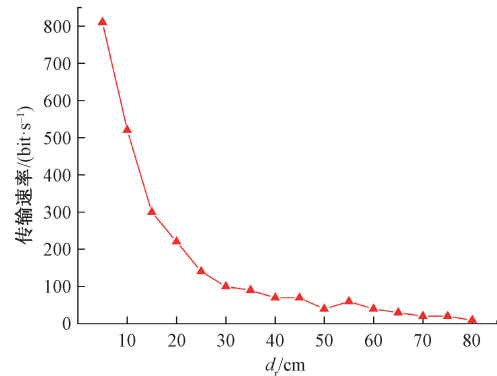
图 12 传感节点功耗测量结果

Fig. 12 The measurement result of sensor node power consumption

3.4 传输速率测试

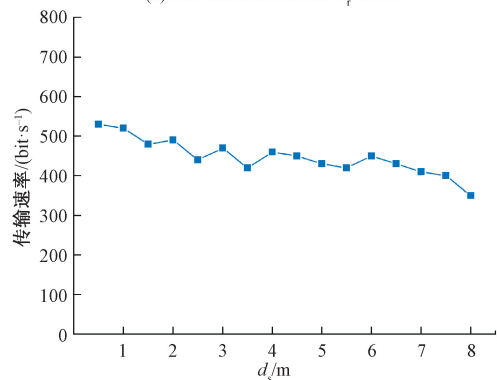
传输速率是衡量无线传感系统性能的重要指标,系统的传输速率同时受距离和 Wi-Fi 发射节点包转发率 v_s 的影响。为评估系统的传输速率,测量系统在不同 d_r 、 d_s 和 v_s 下,重复传输 10 组 200 bit 编码后的传感数据且最高误码率低于 10^{-2} 时,达到的最高传输速率,并将其作为系统在当前 d_r 、 d_s 、 v_s 下可达到的传输速率。图 13(a) 是在 $v_s = 2500$ pps, $d_s = 1$ m 时的传输速率- d_r 曲线,系统可

在 $d_r < 20$ cm 内实现 200 bit/s 以上的传输速率,该速率能够满足无需实时监测的传感应用。根据 2.1 节,系统每次执行传感任务需要 Wi-Fi 接收节点靠近传感节点,以激活传感节点完成传感任务,因此该距离能够满足系统的正常工作。图 13(b) 是在 $v_s = 2500$ pps, $d_r = 10$ cm 时的传输速率- d_s 曲线,系统能够在 $d_s < 7$ m 内实现 400 bit/s 以上的传输速率,可以认为在室内环境中系统无需求 Wi-Fi 发射节点与传感节点的相对位置。实验结果同时验证了 1.4 节对系统传输性能的分析,当 d_r 相对 d_s 足够小时, d_s 与 d 近似相等,此时系统的传输速率主要受 d_r 影响,而几乎不受 d_s 影响。



(a) 传输速率- d_r 曲线

(a) The transmission rate- d_r curve



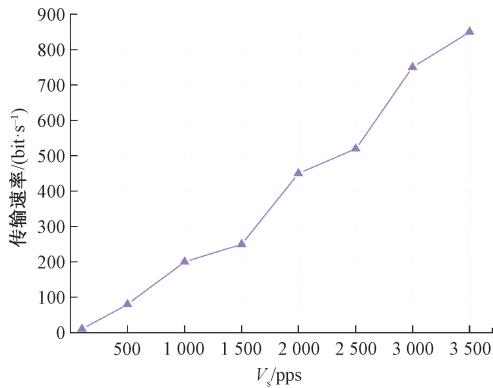
(b) 传输速率- d_s 曲线

(b) The transmission rate- d_s curve

图 13 d_r 和 d_s 对传输速率的影响

Fig. 13 The influence of d_r and d_s on the transmission rate

除距离外,系统的传输速率还受 Wi-Fi 发射节点的包转发率 v_s 影响。图 14 是 $d_r = 10$ cm, $d_s = 1$ m 时的传输速率- v_s 曲线,系统的传输速率具有随 v_s 的增大而增大的趋势。由于 v_s 决定了 Wi-Fi 接收节点获取 CSI 矩阵的速率,提高 v_s 将令 Wi-Fi 接收节点对 Wi-Fi 信道的估计具有更高的时间分辨率,因此使系统能够识别传感节点以更高速率传输的传感数据。若 Wi-Fi 发射节点能够实现线速转发,理论上最高的包转发率可达 25 kpps,系统的传输速率在确定负载阻抗后仍存在进一步提高的潜力。

图 14 传输速率- v_i 曲线Fig. 14 The transmission rate - v_i curve

4 结 论

本文提出一种利用 Wi-Fi 信道的超低功耗无线传感系统,使用反向散射调制技术将传感数据调制于 Wi-Fi 信号中,令传感节点中通信单元的功耗降低至微瓦量级,并通过 Wi-Fi 设备利用 Wi-Fi 信道状态信息识别反向散射 Wi-Fi 信号中的传感数据,摆脱了对专用阅读器的需求。使用路由器、无线网卡和无线传感节点搭建无线温度传感系统,实现了在 200 bit/s 传输速率下可靠的温度传感,其传输速率可通过使用多级负载阻抗与更高的 Wi-Fi 包转发率实现进一步的提高。由于无需主动产生并发射射频载波,传感节点的最高功耗不超过 350 μ W,通信单元的功耗仅为 2 μ W 左右,验证了系统应用于无源无线传感任务的可行性。传感节点的电源可与 Wi-Fi 频段的射频能量采集技术相结合,使系统实现数能同传,完成无源无线传感任务,将基于 Wi-Fi 自供电的物联网成为现实,在智能家居、人体健康检测、医疗诊断等领域发挥重要作用。

参考文献

- [1] SALEHI H, BURGUEÑO R, CHAKRABARTTY S, et al. A comprehensive review of self-powered sensors in civil infrastructure: State-of-the-art and future research trends[J]. *Engineering Structures*, 2021, 234:1-14.
- [2] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, et al. Wireless sensor networks: A survey[J]. *Computer Networks*, 2002, 38(4):393-422.
- [3] CHUGH A, PANDA S. Energy efficient techniques in wireless sensor networks [J]. *Recent Patents on Engineering*, 2019, 13(1):13-19.
- [4] CHEONG W H, OH B, KIM S H, et al. Platform for wireless pressure sensing with built-in battery and instant visualization[J]. *Nano Energy*, 2019, 62:230-238.
- [5] KHAN S M, QAISER N, SHAIKH S F, et al. Design analysis and human tests of foil-based wheezing monitoring system for asthma detection [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2020, 67 (1): 249-257.
- [6] GAO M Y, WANG P, WANG Y F, et al. Self-powered ZigBee wireless sensor nodes for railway condition monitoring [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 19(3):900-909.
- [7] LI H K, DONG W, WANG Y H, et al. Enhancing the performance of 802.15.4-based wireless sensor networks with NB-IoT[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(4):3523-3534.
- [8] CHEN Y Y, YANG J, TRAPPE W, et al. Detecting and localizing identity-based attacks in wireless and sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(5):2418-2434.
- [9] LIAO Y H, LAI H. Investigation of a wireless real-time pH monitoring system based on ruthenium dioxide membrane pH sensor [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69 (2): 479-487.
- [10] 郭颖,王公仆,李宗辉,等. 基于无源反向散射技术的智能标签:应用与挑战[J]. *物联网学报*, 2020, 4(3):20-29.
GUO Y, WANG G P, LI Z H, et al. Smart tags based on the batteryless backscatter technology: Applications and challenges [J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2020, 4(3):20-29.
- [11] 崔粟晋,王雪. 基于长短时记忆太阳能无线传感节点能量预测[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(11): 147-154.
CUI S J, WANG X. Solar wireless sensor node energy prediction based on long-short term memory [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(11):147-154.
- [12] AZEVEDO J A R, SANTOS F E S. Energy harvesting from wind and water for autonomous wireless sensor nodes[J]. *IET Circuits Devices & Systems*, 2012, 6(6):413-420.
- [13] WANG G, LI P, WEN Y, et al. Self-powered ultra-low-power low-threshold synchronous circuit for weak piezoelectric energy harvesting [J]. *Sensors and Actuators A Physical*, 2021, 322:112632.
- [14] SAMPLE A P, YEAGER D J, POWLEDGE P S, et al. Design of an RFID-based battery-free, programmable sensing platform [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2008, 57 (11): 2608-2615.

- [15] SHAFIQ Y, GIBSON J S, KIM H, et al. A reusable battery-free RFID temperature sensor [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(10):6612-6626.
- [16] DENG F M, HE Y G, LI B, et al. Design of a slotted chipless RFID humidity sensor [J]. Sensors and Actuators B-Chemical, 2018, 264:255-262.
- [17] 徐壮壮, 文玉梅, 邵壮, 等. 通用无源超高频射频传感标签[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(12):158-165.
- XU ZH ZH, WEN Y M, SHAO ZH, et al. Universal passive UHF radio frequency sensing tags [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(12):158-165.
- [18] SHAO Z, WEN Y, XU Z, et al. Cable current detection with passive RF sensing tags[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, DOI:10.1109/TIE.2021.3051590.
- [19] BHARADIA D, JOSHI K R, KOTARU M, et al. BackFi: High throughput WiFi backscatter [J]. Computer Communication Review, 2015, 45(4):283-296.
- [20] 薛敏, 孙炜, 余洪山, 等. 基于WiFi指纹的层级学习室内定位模型[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(4):118-126.
- XUE M, SUN W, YU H SH, et al. Hierarchical deep learning model to locate the mobile device via WiFi fingerprints[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(4):118-126.
- [21] ABDELNASSER H, HARRAS K, YOUSSEF M. A ubiquitous WiFi-based fine-grained gesture recognition system [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2019, 18(11):2474-2487.
- [22] WANG X, YANG C, MAO S. PhaseBeat: Exploiting CSI phase data for vital sign monitoring with commodity WiFi devices [C]. 2017 IEEE 37th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS), Atlanta, GA, USA, 2017:1230-1239.
- [23] NIKITIN P V, RAO K V S. Theory and measurement of backscattering from RFID tags [J]. IEEE Antennas and

Propagation Magazine, 2006, 48(6):212-218.

- [24] HALPERIN D, HU W J, SHETH A, et al. Tool release: Gathering 802.11n traces with channel state information [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2011, 41(1):53.

作者简介



冯笑晨, 2019年于武汉大学获得学士学位, 现在为上海交通大学硕士研究生, 主要研究方向为无线传感技术与仪器。

E-mail: 119035910004@sjtu.edu.cn

Feng Xiaochen received his B.Sc. degree from Wuhan University in 2019. He is currently a master student at Shanghai Jiao Tong University. His main research interests include wireless sensing technology and instrumentation.



邵壮, 2016年于电子科技大学获得学士学位, 2019年于中国空间技术研究院获得硕士学位。现为上海交通大学电子信息与电气工程学院博士研究生, 主要研究方向为无线传感技术与仪器。

E-mail: shaozhuang@sjtu.edu.cn

Shao Zhuang received his B.Sc. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2016, and received his M.Sc. degree from the China Academy of Space Technology in 2019. He is currently a Ph.D. candidate at Shanghai Jiao Tong University. His main research interests include wireless sensing technology and instrumentation.



文玉梅(通信作者), 上海交通大学电子信息与电气工程学院教授, 博士生导师。主要研究方向为信息获取与处理、传感器与仪器、能量采集。

E-mail: yumei.wen@sjtu.edu.cn

Wen Yumei (Corresponding author) is currently a professor in the School of Electronic Information and Electrical Engineering at Shanghai Jiao Tong University. Her main research interests include signal acquisition and processing, sensors and instrumentation, and energy-harvesting.