

# WiFi 与 ZigBee 双向移动跨网通信方法研究

李 鸣<sup>1</sup>, 许善智<sup>2\*</sup>, 尹雨晴<sup>1</sup>, 杨 旭<sup>1</sup>, 牛 强<sup>1</sup>, 李子龙<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学计算机科学与技术学院, 江苏徐州 221116; 2. 青岛城市学院计算机工程学院, 山东青岛 266106)

**摘 要:** 物联网设备的爆发式增长推进了异构无线设备互联互通的进程, 跨网通信技术(Cross-Technology Communication, CTC)允许同一频段下遵循不同底层协议的无线设备在无需网关的前提下实现直联, 但移动状态下的双向跨网通信方法仍缺乏系统的研究. 本文提出了一种基于能量感知的跨网通信方案——MobiCTC, 它支持 WiFi 与 ZigBee 设备移动状态下的双向跨网通信. WiFi 到 ZigBee 方向, 该方案利用 RSSI(Received Signal Strength Indicator)作为解码信息, 基于能级映射实现信息解码; ZigBee 到 WiFi 方向, 该方案采用 CSI(Channel State Information)作为解码信息, 充分挖掘 CSI 的幅度与相位信息, 利用机器学习方法实现分类解码. 最后, 本文使用 TelosB 节点和 USRP X310 平台对 MobiCTC 方案进行了实验验证. 实验结果表明, 移动状态下 WiFi 到 ZigBee 方向的系统吞吐量为 139.535 bps, 较 WiZig 提高了 1.82 倍, 符号错误率为 0.016, 与 WiZig 基本持平; ZigBee 到 WiFi 方向的系统吞吐量为 250 bps, 较 FreeBee 提高了 15.7%, 符号错误率为 0.0516, 较 ZigFi 下降了 23.21%.

**关键词:** 异构设备; 跨网通信; 无线通信; 接收信号强度; 信道状态信息

**基金项目:** 国家自然科学基金(No.51874302)

**中图分类号:** TN919

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2024)11-3858-07

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20230715

## Research on Bidirectional Mobile Cross-Technology Communication Method Between WiFi and ZigBee

LI Ming<sup>1</sup>, XU Shan-zhi<sup>2\*</sup>, YIN Yu-qing<sup>1</sup>, YANG Xu<sup>1</sup>, NIU Qiang<sup>1</sup>, LI Zi-long<sup>1</sup>

(1. School of Computer Science and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

2. School of Computer Information Engineering, Qingdao City University, Qingdao, Shandong 266106, China)

**Abstract:** The exponential increase of IoT devices has accelerated the process of interconnecting heterogeneous wireless devices, and the cross-technology communication (CTC) technique enables wireless devices to operate in the same band and use different underlying protocols to connect directly without gateways. Nevertheless, systematic research on the two-way CTC of heterogeneous mobile devices is still lacking. This paper proposes MobiCTC, a CTC scheme based on energy sensing that supports bidirectional CTC between mobile WiFi and ZigBee devices. In the WiFi-to-ZigBee direction, the scheme uses RSSI as the decoding information and an energy-level mapping scheme to achieve information decoding. In the ZigBee to WiFi direction, the scheme adopts CSI as the decoding information, fully exploits CSI's amplitude and phase information and uses a machine learning method for decoding. Finally, this paper designs and implements MobiCTC using the TelosB node and USRP X310 platform, as well as experimental verification. The experimental results show that in the mobile state, the WiFi to ZigBee communication throughput is 139.535 bps, which is 1.82 times higher than WiZig, and the symbol error rate is 0.016, which is basically the same as WiZig; the ZigBee to WiFi communication throughput is 250 bps, which is 15.7% higher than FreeBee, and the symbol error rate is 0.0516, which is a decrease of 23.21% compared to ZigFi.

**Key words:** heterogeneous devices; cross-technology communication; wireless communication; received signal strength indicator; channel state information

**Foundation Item(s):** National Natural Science Foundation of China (No.51874302)

## 1 引言

IoT设备数量的爆发式增长,导致了无线频谱的激烈竞争.针对异构终端同频干扰问题,现有的无线通信研究提出了干扰避让<sup>[1-3]</sup>与容错控制<sup>[4]</sup>.然而,上述方法难以解决物联网设备增长带来日益严重的干扰问题.将干扰转化为信息,实现异构设备间的互联互通为解决异构干扰提供了一种新的思路.

跨网通信技术(Cross-Technology Communication, CTC)为异构设备提供了频谱资源共享的机会,满足了不同无线协议间的通信需求<sup>[5,6]</sup>.目前跨网通信的研究可分为包级CTC与物理级CTC.包级CTC的基本思想是将数据包作为调制的基础,利用数据包的长度、能量、间隔、序列模式等特点建立侧信道,进行数据传递.WiZig<sup>[7]</sup>采用能级调制方案,自适应调整编码能级数量和解码窗口长度,实现噪声环境下WiFi到ZigBee的跨网通信;PRComm<sup>[8]</sup>基于伪随机序列构建不同时序的WiFi数据包,提高WiFi到ZigBee跨网通信的抗干扰性;ZigFi<sup>[9]</sup>将ZigBee数据包与正在传输的WiFi数据包重叠,利用重叠数据包的信道状态信息(Channel State Information, CSI)实现ZigBee到WiFi方向的直联通信;文献[10]在此基础上使用深度学习方法提高解码准确率;LoRaBee<sup>[11]</sup>利用数据包能量,使用ZigBee设备对RSSI(Received Signal Strength Indicator)进行采样来解码LoRa中所携带的跨网信息.物理级CTC采用物理层仿真技术或交叉解码技术实现了较高吞吐量的跨网信息传输.WeBee<sup>[12]</sup>、LongBee<sup>[13]</sup>、WiRa<sup>[14]</sup>等利用物理层仿真技术,使WiFi信号密切模拟ZigBee或LoRa的射频波形,实现WiFi到ZigBee、LoRa的跨网通信,但其限制了窄带ZigBee或Lora到宽带WiFi的反向通信;XBee<sup>[15]</sup>、LEGO-Fi<sup>[16]</sup>通过接收端交叉解码技术,将复杂性推向接收端,实现ZigBee到蓝牙、ZigBee到WiFi的反向跨网通信.

当前CTC方案主要是在实验室静止环境下实现,移动状态下双向跨网通信也面临着诸多挑战.数据包级方案中,用于解码的接收信号能量会随着收发端相对位置的变化而变化,与发射增益不再是简单的对应关系;物理层CTC方案在收发端移动状态下,随着信道条件与噪声的迅速变化,信号仿真导致的误差会急剧加剧.

本文提出一种数据包级双向移动跨网通信方案,在不影响同构信号传输的同时,利用能量感知与映射方案,在发射端构造特殊序列模式的数据包对跨网信息进行编码,在接收端充分发掘RSSI与CSI潜力,通过感知RSSI或CSI的不同序列模式完成解码,实现了移动状态下WiFi与ZigBee终端间的双向直联通信.相较于物理级CTC方案,数据包级方案普适性更强,无需修

改硬件,可兼容现有商业设备.最后,本文在USRPX310平台与TelosB节点上设计并验证了该方案,实现了WiFi与ZigBee间的双向移动跨网通信.

## 2 异构干扰

同一时空内,当无线设备数量较多时,工作在相近乃至相同频段的设备,不可避免地相互干扰<sup>[17]</sup>.当2.4 GHz的WiFi与ZigBee设备在同一环境同时工作时,由于ZigBee设备发射功率低、带宽窄,很容易受到WiFi信号的严重干扰.类似地,ZigBee也会对工作在同一频段的WiFi产生干扰.ZigBee对WiFi的干扰可分为相长干扰与相消干扰.当ZigBee跨网信号与相位相同的WiFi信号碰撞后,WiFi信号CSI的幅度会增加,此时ZigBee对WiFi的作用称为相长干扰.相反地,若ZigBee信号对WiFi信号的作用是破坏性的,则称为相消干扰.

受此启发,本文利用重叠信道中的异构干扰,建立基于能量的侧信道,在不影响同构信号传输的同时,完成异构设备间直联通信.

## 3 系统模型

本文设计并实现了WiFi与ZigBee设备的双向移动跨网通信——MobiCTC.系统架构如图1所示,发送端使用ASK(Amplitude Shift Keying)编码构造接收端可识别的能级序列包,建立能量感知侧信道,实现能级编码.

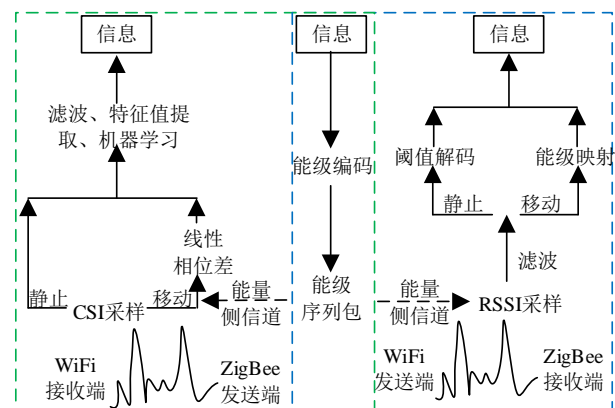


图1 MobiCTC系统架构图

WiFi到ZigBee方向的接收端,利用RSSI采样及阈值解码方案实现接收;ZigBee到WiFi方向的接收端,利用CSI采样,通过机器学习算法实现解码.同时,针对接收端收到的能量信号随收发端相对位置变化问题,WiFi到ZigBee方向解码时对RSSI序列采用能级映射方案,降低了终端移动状态下通信的误码率;针对CSI相位偏移问题,ZigBee到WiFi方向的接收端对CSI相位进行线性相位差变换,保障跨网信息的准确传输.

### 3.1 WiFi 到 ZigBee 方向跨网通信

#### 3.1.1 发射端编码

在本方案中,在发射端,利用 USRP 设备构建 WiFi 数据包,通过调整发射功率、数据包长度、数据包间隔、编码方式等参数实现发送端数据包编码,在保证正常 WiFi 信号收发的同时,携带了 ZigBee 设备可识别的特殊模式. 由于 ZigBee 设备的 RSSI 采样率有限,因此,通过调节 WiFi 数据包的发射功率可以快速构造 ZigBee 设备可识别的最显著的能量序列,保障跨网信息传输的准确度.

#### 3.1.2 接收端解码

在接收端,TelosB 节点扫描信道获取 RSSI 序列值后,根据预设的解码阈值在预设的解码窗口中进行解码,判别 WiFi 数据包所属能级,最终解码得到“0”“1”序列值. 直观来看,只要 TelosB 节点采样 RSSI 值的频率足够高,就可以捕捉到信道中每个 WiFi 数据包引起的 RSSI 数值变化. 但该方法存在一些挑战. 首先 TelosB 节点感知信道时,无法区分 RSSI 值的变化是由 WiFi 信号源还是空中其他干扰源引起;其次 ZigBee 节点在计算资源、存储空间、能量供应等方面存在诸多限制,不足以支撑复杂的解码过程.

当 WiFi 与 ZigBee 设备位置固定时,不同的 WiFi 编码能级对应不同扰动幅度的 RSSI 序列,据此实现 CTC 解码. 以 4 个调制能级为例,公式(1)给出了解码判别函数,在每一个接收窗口运用此函数即可获得解码结果.

$$y = \begin{cases} 11, & \text{RSSI} \geq R_2 \wedge m \geq \frac{2}{3}M \\ 10, & R_1 \leq \text{RSSI} < R_2 \wedge m \geq \frac{2}{3}M \\ 01, & R_0 \leq \text{RSSI} < R_1 \wedge m \geq \frac{2}{3}M \\ 00, & \text{RSSI} < R_0 \wedge m \geq \frac{2}{3}M \end{cases} \quad (1)$$

其中, $y$  表示解码结果, $R_0, R_1, R_2$  表示 3 个阈值端点, $m$  表示一个解码窗口中满足阈值判断条件的接收信号强度值的个数, $M$  为一个解码窗口中采集接收信号强度值的总个数. 考虑到接收端 RSSI 采样率有限,不失一般性,这里认为解码窗口中  $2/3$  以上的接收信号强度值满足阈值条件,即可解码为对应的 CTC 信息.

实际应用场景中,通信节点通常具有一定移动性,设备间相对位置的变化也会使得接收端采样的 RSSI 序列值发生改变.

图 2 给出了移动状态 ZigBee 接收端的解码策略. 由于接收端 TelosB 节点的 RSSI 采样率高达几千赫兹,故认为一个解码窗口内收发端相对位置不变. 不失一般性,假设 WiFi 发送端位置固定,匀速移动 ZigBee 接收端,实现收发端相对位置变化. ZigBee 端解码策略分为 2 个部分:离线生成解码策略、在线传输 CTC 信息. 离线部分主要负责解码策略的生成. 首先在预备阶段,WiFi 端保持

静止且发射增益固定为 30 dB,ZigBee 端由远及近做匀速直线运动,同时采集 RSSI 数据,并对其降噪处理,滤除突发干扰. 据此建立 RSSI 与通信距离  $D$  的映射关系(RSSI- $D$ ),完成固定发射增益下的距离估算. 考虑到当 WiFi 发射增益较低且收发端距离较远时,ZigBee 接收节点无法获取来自 WiFi 端的跨网信息,故设置距离估算时的最大距离为  $D_0$ . 即当 ZigBee 节点由远及近匀速接近 WiFi 发射端,若距离估算为  $D_0$ ,则进入 CTC 解码阶段. 其次,在 CTC 阶段,WiFi 发射端按照编码能级调整发射增益,ZigBee 接收端采集 RSSI 序列并降噪. 在已知 RSSI 序列值与收发端距离的前提下,本文建立 RSSI、距离  $D$  与发射增益  $G$  之间的映射((RSSI, $D$ )- $G$ ),不同的发射增益对应着 WiFi 发送端不同的编码信息,由此得到 CTC 解码方案. 跨网信息在线传输部分根据离线部分生成的解码策略完成  $D_0$  距离内 CTC 信息的解码与输出.

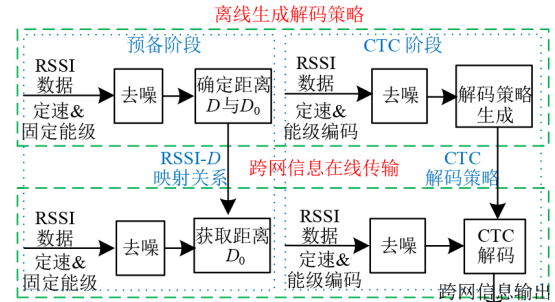


图 2 接收端解码策略

### 3.2 ZigBee 到 WiFi 方向跨网通信

#### 3.2.1 发射端编码

TelosB 节点作为 ZigBee 的发射端,通过调整不同数据包的发射功率构造可识别的 ZigBee 数据包模式,且不同数据包的发射功率差值最高为 25 dBm,具有足够的编码空间. 发射端编码的过程中调整 ZigBee 数据包间隔与持续时间,确保其与至少一个 WiFi 数据包发生碰撞,干扰 WiFi 的前导码信息,以此产生对 WiFi CSI 的影响,实现跨网通信. 因此,对于发送的 ZigBee 数据包,应使得下式成立:

$$T_{IZ} \leq T_{DW} + T_{IW} \leq T_{DZ} \quad (2)$$

其中, $T_{DW}, T_{IW}$  表示 WiFi 数据包持续时间与间隔, $T_{DZ}, T_{IZ}$  表示 ZigBee 数据包持续时间与间隔. 一般情况下,取 WiFi 数据包间隔时间为 500  $\mu\text{s}$ .

这里,为确保低功耗的 ZigBee 能够占有信道,实现与 WiFi 间的跨网信息传递,系统尝试禁用 ZigBee 的 CSMA(Carrier Sense Multiple Access),因此取 ZigBee 数据包间隔时间为 192  $\mu\text{s}$ .

#### 3.2.2 接收端解码

由第 2 节可知,ZigBee 信号的传输会干扰频段接近

的 WiFi 子载波的 CSI 幅度, 而干扰的不确定性使得很难用准确的阈值区分有无 ZigBee 数据包. 因此, 本文采用机器学习方法将接收端解码问题转化为分类问题.

静止状态下, 首先通过选择适当的 CSI 信息, 考虑天线选择、子载波选择以及是否使用相位数据等因素, 以提高解码效率和准确性. 采用 Hampel 滤波方法去除离群点, 确保在复杂环境中的准确解码. 通过提取统计特征值, 如均值、最大值、最小值等, 并利用支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 进行分类, 以解决 ZigBee 对 WiFi 信号 CSI 干扰的分类问题.

运动状态下解码策略与静止状态下解码策略类似, 然而, 移动状态下信道环境的剧烈变化给解码造成了更大的困难.

CSI 相位信息因收发两端难以完全同步时常被摒弃. 本文通过对 CSI 相位数据线性变换, 消除同步误差, 使相位数据更真实地反映当前的信道状态.

第  $k$  个子载波信道频率响应 (Channel Frequency Response, CFR) 的测量相位与真实相位间会存在误差, 产生偏移, 测量相位为

$$\hat{\phi}_k = \phi_k + 2\pi \frac{k}{N} \delta + \beta + Z_k \quad (3)$$

其中,  $\phi_k$  为第  $k$  个子载波 CFR 采样的真实相位,  $k$  为子载波索引编号,  $N$  为 FFT 解调部分的采样数,  $\delta$  是时钟同步造成的误差,  $\beta$  是载波频率误差导致的相位偏移常数,  $Z_k$  是随机噪声引起的相位误差.

为获取真实的相位值  $\phi_k$ , 需要消除上述 3 个误差. 其中, 随机噪声引起的误差  $Z_k$ , 通常是由很小的高斯白噪声产生, 可忽略不计, 则第  $k$  个子载波的相位误差为  $2\pi \frac{k}{N} \delta + \beta$ .

假设测量相位的斜率与均值分别为  $a$  和  $b$ , 则

$$\begin{cases} a = \frac{\hat{\phi}_{k_n} - \hat{\phi}_{k_1}}{k_n - k_1} = \frac{\phi_{k_n} - \phi_{k_1}}{k_n - k_1} + \frac{2\pi}{N} \delta \\ b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{\phi}_{k_i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \phi_{k_i} + \frac{2\pi\delta}{nN} \sum_{i=1}^n k_i + \beta \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $n$  为子载波个数,  $\hat{\phi}_{k_n}$  和  $\hat{\phi}_{k_1}$  为  $\hat{\phi}_k$  的 2 次测量值, 由于 WiFi 的子载波索引编号都是对称的, 所以  $\sum_{i=1}^n k_i = 0$ , 故  $b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \phi_{k_i} + \beta$ .

由式(4)可以看出,  $a$  和  $b$  中分别包含了误差  $\delta$  与  $\beta$ , 可用于消除相位误差, 因此变换后的相位误差为

$$\tilde{\phi}_{k_i} = \phi_{k_i} - \frac{k_i}{k_n - k_1} (\phi_{k_n} - \phi_{k_1}) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \phi_{k_i} \quad (5)$$

故变换后的相位不再受误差  $\delta$  与  $\beta$  影响, 仅与当前的真实相位值与子载波索引编号有关, 可真实地反映

当前信道状态信息, 更好地传递跨网信息. 移动状态下的后续解码策略与静止状态类似, 包括滤波、特征值提取与利用机器学习方法进行分类.

## 4 实验评估

本文选用搭配了 UBX 与 SBX 射频子板的 USRP X310 作为 WiFi 的收发设备, 使用 Gnu Radio 平台构建 WiFi 的工作流程. 选用 TelosB 节点作为 ZigBee 的收发设备, 软件端采用 Contiki 操作系统. 实验中, WiFi 与 ZigBee 分别选用 11、23 信道, 静止状态下相距 2 m, 移动状态下运动范围为 0~7 m.

同时, 实验选择一间较为宽敞的教室, 周围覆盖了校园网、个人热点、蓝牙等无线信号, 诸多干扰源的存在为实验创造了一个具有挑战性的环境. 这里使用吞吐量与符号错误率 (Symbol Error Rate, SER) 作为评估系统可靠性与整体性能的主要指标.

### 4.1 WiFi 到 ZigBee 方向跨网通信

静止状态下, 设置 TelosB 节点采样频率为 3 kHz, 接收端解码窗口为 5 ms. 当编码能级为 4 时, 一个解码窗口可被编码为 “00” “01” “10” “11”. WiFi 发送端增益设置为 10 dB、20 dB 与 30 dB, 这里设置解码阈值为 -82 dBm、-66 dBm、-54 dBm, 此时 SER 为 0, 考虑到硬件限制及软件端数据处理延迟, 实际吞吐量为 139.535 bps.

移动状态下, 首先在离线状态, 通过大量的数据收集与分析, 确定 CTC 通信的最大范围  $D_0$  与解码映射方案. 当编码能级为 4 时, 离线阶段 TelosB 节点采集到的 RSSI 序列均值与发射增益、收发端相对距离的关系如图 3 所示. 采用函数拟合确定距离  $D$ , 增益  $G$  与 RSSI 间的映射关系, 在 95% 的置信区间下, 拟合函数为

$$R = -13.421gD + 1.466G - 0.1416DG - 80.56 \quad (6)$$

此时拟合的决定系数  $R$ -square 为 0.976, 拟合效果较好. 随着距离的增大, 不同编码能级下采样得到的 RSSI 序列值愈加接近, 解码错误率更高. 在  $D_0$  范围内, WiFi 发射端交替发送 “00” “01” “10” “11”, SER 为 0.016.

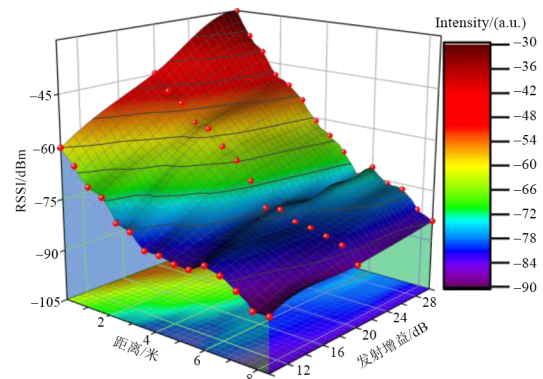


图 3 RSSI 与距离、发射增益关系

为了验证该方案的有效性,本文与 WiZig<sup>[7]</sup>进行了性能对比,WiZig为静止状态下WiFi到ZigBee方向跨网通信解决方案.图4展示了MobiCTC与WiZig在静止与运动情况下的吞吐量对比,静止状态下,WiZig吞吐量为153.85 bps,略高于MobiCTC.移动状态下(速度为2 m/s),由于WiZig未对移动场景进行优化,为保证一定的解码准确性,只能被动地降低编码能级并增大解码窗口大小,因此吞吐量仅为49.5 bps,远低于MobiCTC.符号错误率方面,MobiCTC在静止情形下,SER为0,在移动情形下,SER为0.016,WiZig的符号错误率始终低于0.01,二者总体差别不大.

#### 4.2 ZigBee到WiFi方向跨网通信

静止状态下,TelosB节点周期性发送ZigBee数据包,同时在周围部署多个WiFi AP产生WiFi流量,USRPN通过Gnu Radio流图采集2根天线的52个非空子载波的CSI.这里设置CSI的采样频率为1.25 kHz,接收端解码窗口大小为8 ms,每个解码窗口内包含10个CSI.当编码能级为4时,ZigBee发射端功率分别为0、-10和-20 dBm,根据有无ZigBee干扰及ZigBee不同功率下的不同干扰程度,可分别编码为“00”“01”“10”“11”,一个解码窗口内可传递2 bit信息.仅选取一根天线9号子载波的CSI幅度信息,采用线性SVM算法进行解码,此时SER为0.017,吞吐量为250 bps.符号错误率的主要来源是少许跨网信息“00”与“01”间的误判.

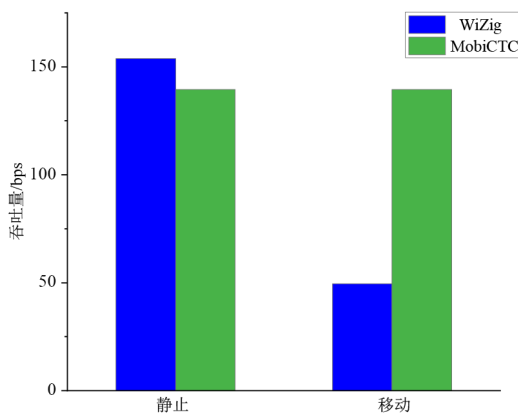


图4 WiZig与MobiCTC吞吐量对比

本文对比了ZigBee到WiFi方向最具代表性的3项成果FreeBee<sup>[18]</sup>、文献[10]与ZigFi<sup>[9]</sup>.其中,FreeBee利用ZigBee数据包发送时间进行编码,WiFi端通过识别不同强度的RSSI完成解码;文献[10]、ZigFi与MobiCTC均利用ZigBee端能级编码,WiFi端通过识别不同模式的CSI序列完成解码.相较于RSSI,ZigBee信号对CSI的影响更为敏感,因此,文献[10]、ZigFi与MobiCTC的各项性能普遍优于FreeBee.而文献[10]发送端采用单能级编码方案,接收端采用深度学习方法,计算复杂

度较大,且解码窗口较大,因此在吞吐量和符号错误率方面均低于ZigFi.此外,MobiCTC在文献[10]和ZigFi的基础上充分挖掘了CSI信息,使用CSI幅度融合双天线线性相位差,更好地实现跨网信息的准确传递.图5是FreeBee、ZigFi、文献[10]和MobiCTC在静止情况下的吞吐量与误码率比较,MibiCTC的吞吐量是FreeBee的8倍,较文献[10]和ZigFi也分别提高了123.21%与15.79%,且符号错误率也有较为明显的改善.

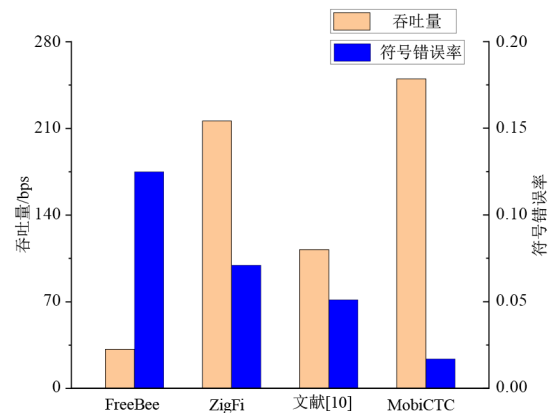


图5 静止状态下性能对比

移动状态下,采用与静止状态一样的解码参数,SER为0.197,吞吐量为250 bps,通信质量与静止时相比有明显的下降.针对通信准确率问题,尝试增大解码窗口大小,让每个解码窗口内包含更多的CSI信息.在牺牲吞吐量的情形下,保证解码准确率.如图6所示,解码窗口逐渐增大,其中包含的CSI个数由10个增加到20个,解码准确率也由80.37%增加到92.57%,但系统吞吐量却由原先的250 bps降低至125 bps.

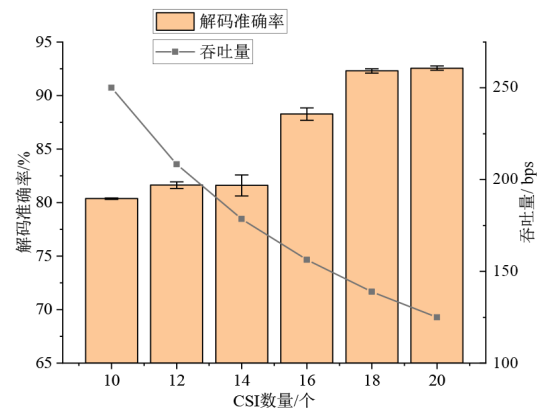


图6 CSI数量与解码准确率、吞吐量关系

由于WiFi接收端具有多根接收天线,在此前的解码过程中只使用了其中一根,因此,为了提高系统吞吐量,这里加入另一根天线的CSI信息.当解码窗口大小为8 ms时,选取2根天线9号子载波的CSI幅度信息,此时

SER 为 0.096。相较于单天线的 CSI 幅度信息, 双天线 CSI 幅度信息使得跨网信息“10”与“11”在解码过程中混淆状况有所缓解, 解码准确率提高了 12.58%。不仅如此, 实验中在解码窗口内加入 2 根天线的线性相位差, 此时 SER 为 0.0516。双天线线性相位差信息的加入使得解码准确率较单天线幅度信息与双天线幅度信息分别提高了 18.11% 与 4.91%, 解决了运动状态下, ZigBee 到 WiFi 方向的跨网通信无法兼顾系统吞吐量与准确率的问题。

本文尝试对比了 ZigFi 在异构设备移动时的性能。图 7 是 ZigFi 与 MobiCTC 在静止、低速移动(1.2 m/s)、快速移动(2.5 m/s)3 种状态下的符号错误率比较, 在吞吐量保持不变的前提下, 移动状态下的 ZigFi 符号错误率较静止状态有明显的上升, 尤其在快速移动的情况下, ZigFi 符号错误率达到了 0.196, 难以满足正常通信需求。相比之下, MobiCTC 针对移动状态下 ZigBee 到 WiFi 方向通信有明显优化, 即使在快速移动的情况下, 系统的符号错误率仍保持在可控的范围内。

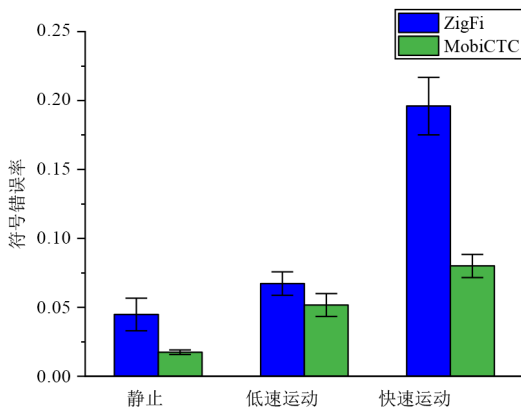


图 7 不同情形下 ZigFi 与 MobiCTC 的 SER 对比

## 5 总结

本文设计并实现了一种移动状态下 WiFi 到 ZigBee 的双向跨网通信方案——MobiCTC, 它通过调整发射端的发射能级构造接收端可识别的能量数据包实现编码, 接收端判别 RSSI/CSI 的不同序列模式完成解码, 实现了 WiFi 与 ZigBee 设备间的双向直联通信。最后通过广泛的实验证明了相比现有 CTC 方案, 该方案具有较好的可靠性与稳定性。该方案未来可应用于智能家居以及工业物联网中, 以期拓展现有的通信手段, 实现泛在互联。

### 参考文献

[1] TAVAKOLI R, NABI M, BASTEN T, et al. Dependable interference-aware time-slotted channel hopping for wireless sensor networks[J]. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2018, 14(1): 1-35.

[2] SANABRIA-RUSSO L, BARCELO J, BELLALTA B, et al.

A high efficiency MAC protocol for WLANs: Providing fairness in dense scenarios[J]. *ACM Transactions on Networking*, 2017, 25(1): 492-505.

- [3] BHARATI S, OMAR H A, ZHUANG W H. Enhancing transmission collision detection for distributed TDMA in vehicular networks[J]. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications*, 2017, 13(3s): 1-21.
- [4] YAN Y B, YANG P L, LI X Y, et al. ZIMO: Building cross-technology MIMO to harmonize zigbee smog with WiFi flash without intervention[C]//*Proceedings of the 19th Annual International Conference on Mobile Computing & Networking-MobiCom'13*. New York: ACM, 2013: 465-476.
- [5] CHEN Y, LI M, CHEN P P, et al. Survey of cross-technology communication for IoT heterogeneous devices[J]. *IET Communications*, 2019, 13(12):1709-1720.
- [6] 曹东江, 王帅, 熊润群, 等. 异构物联网直联通信关键技术[J]. *中国科学: 信息科学*, 2021, 51(10): 1738-1754.
- CAO D J, WANG S, XIONG R Q, et al. The key technologies of cross-technology communication[J]. *Scientia Sinica: Informationis*, 2021, 51(10): 1738-1754. (in Chinese)
- [7] GUO X Z, HE Y, ZHENG X L. WiZig: Cross-technology energy communication over a noisy channel[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2020, 28(6): 2449-2460.
- [8] WANG W, HE D S, JIA W, et al. PRComm: Anti-interference cross-technology communication based on pseudo-random sequence[C]//*Proceedings of the 20th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (co-located with CPS-IoT Week 2021)*. New York: ACM, 2021: 163-175.
- [9] GUO X Z, HE Y, ZHENG X L, et al. ZIGFI: Harnessing channel state information for cross-technology communication[C]//*IEEE INFOCOM 2018-Conference on Computer Communications*. Piscataway: IEEE, 2018: 360-368.
- [10] FAN W D, CHEN T, GU Y, et al. Cross-technology communication between WiFi and ZigBee[C]//*2022 IEEE 9th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications (MAPE)*. Piscataway: IEEE, 2022: 370-373.
- [11] SHI J Y, MU D, SHA M. Enabling cross-technology communication from LoRa to ZigBee via payload encoding in sub-1 GHz bands[J]. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2022, 18(1): 1-26.

- [12] LI Z J, HE T. WEBe: Physical-layer cross-technology communication via emulation[C]//Proceedings of the 23rd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2017: 2-14.
- [13] LI Z J, HE T. LongBee: Enabling long-range cross-technology communication[C]//IEEE INFOCOM 2018-Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE, 2018: 162-170.
- [14] XIA D, ZHENG X L, YU F, et al. WiRa: Enabling cross-technology communication from WiFi to LoRa with IEEE 802.11ax[C]//IEEE INFOCOM 2022-Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE, 2022: 430-439.
- [15] JIANG W C, KIM S M, LI Z J, et al. Achieving receiver-side cross-technology communication with cross-decoding[C]//Proceedings of the 24th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2018: 639-652.
- [16] GUO X Z, HE Y, ZHENG X L, et al. LEGO-fi: Transmitter-transparent CTC with cross-demapping[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(8): 6665-6676.
- [17] DOLIŃSKA I, JAKUBOWSKI M, MASIUKIEWICZ A. Interference comparison in Wi-Fi 2.4 GHz and 5 GHz bands[C]//2017 International Conference on Information and Digital Technologies (IDT). Piscataway: IEEE, 2017: 106-112.
- [18] KIM S M, HE T. FreeBee: Cross-technology communication via free side-channel[C]//Proceedings of the 21st Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2015: 317-330.

#### 作者简介



李 鸣 女, 1984 年 4 月出生, 安徽淮  
北人. 中国矿业大学计算机科学与技术学院副  
教授, 硕士生导师. 研究方向为智能信息处理、  
异构无线网络、无线感知等.

E-mail: lmgYW@cumt.edu.cn



许善智 男, 1996 年 10 月出生, 江苏徐州  
人. 2023 年硕士毕业于中国矿业大学计算机  
科学与技术学院, 现为青岛城市学院教师. 研究  
方向为异构无线网络.

E-mail: xushanzhi@cumt.edu.cn