

深圳大学考试答题纸

(以论文、报告等形式考核专用)

二〇二三~二〇二四 学年度第 一 学期

课程编号	1501990037	课程名称	智能网络与计算	主讲教师	车越岭	评分	
学 号	2021220003	姓 名	梁润宇	专业年级	2021 级计算机科学与技术		

教师评语:

题目:

WiZig: 嘈杂通道上的跨技术能源通信

《智能网络与计算》期末大报告

2023-2024 学年第一学期

论文题目: WiZig: 嘈杂通道上的跨技术能源通信

英文题目: WiZig Cross-Technology Energy Communication Over a Noisy Channel

姓 名: 梁润宇

学 号: 2021220003

讲解时间: 2023.12.21

撰写报告时间: 2024.01.01-2024.01.10

摘 要

本论文以异构无线设备之间无处不在的连接需求为研究背景,研究内容是提出了一种新的 CTC 技术 (WiZig),用于实现 WiFi 到 ZigBee 的能量通信,并在噪声信道下优化通信吞吐量。WiZig 利用幅度和时间两个维度的调制技术,来编码和解码 WiFi 信号的能量变化,从而实现 WiFi 到 ZigBee 的 CTC。本论文创新性地建立了一个能量通信信道的理论模型,设计了一个在线速率自适应算法,实现了 WiZig 的原型。在真实环境下达到 153.85bps 的吞吐量,且符号误码率低于 1%。在不同的信道噪声条件下,都可以实现高效可靠的 CTC,相比于现有的 CTC 技术吞吐量提高了 2.5 倍至 10 倍。本论文提出的 WiZig 的在线速率自适应算法可以快速地适应信道噪声的变化,且与理论模型的预测结果非常接近。

1. 研究背景及意义

1.1 研究背景与动机

本论文的研究背景是物联网 (IoT) 应用的快速发展带来了异构无线设备之间无处不在的连接需求。异构无线设备指的是遵循不同标准的无线设备,例如 WiFi、ZigBee、蓝牙等。为了实现这些设备之间的直接数据交换,跨技术通信 (CTC) 是一种重要的技术。

本论文的研究动机是现有的 CTC 技术在噪声信道下的性能有限,现有的 CTC 技术主要利用频率、幅度或时间维度的副信道来实现 CTC,但是这些副信道都受到信道噪声的影响,导致通信效率低下。因此,本论文提出了一种新的 CTC 技术,即 WiZig,它利用幅度和时间两个维度的调制技术,来优化噪声信道下的 CTC 吞吐量。

1.2 研究意义

本论文的研究意义是它为实现高效可靠的 CTC 提供了一种新的解决方案。本论文建立了一个能量通信信道的理论模型,清晰地理解了信道容量。然后,本论文设计了一个在线速率自适应算法,根据信道条件调整调制策略。基于理论模型, WiZig 可以准确地控制编码能量幅度的个数和接收窗口的长度,从而优化 CTC 吞吐量。本论文在软件无线电平台和商用 ZigBee 设备上实现了 WiZig 的原型,评估结果显示, WiZig 在真实环境下可以达到 153.85bps 的吞吐量,且符号误码率低于 1%。这些结果证明了 WiZig 在不同信道条件下实现了高效可靠的 CTC。

2. 国内外研究现状

本论文的研究问题是如何实现 WiFi 到 ZigBee 的跨技术能量通信 (CTC)，并在噪声信道下优化通信吞吐量。与本论文相关的已有工作主要可以分为以下三类：

利用频率副信道的 CTC 技术：这类技术通过在不同的频率上发送或接收信号，来实现不同无线技术之间的通信。例如，FreeBee 利用 WiFi 信号在 ZigBee 信道上产生的频谱泄漏，来实现 WiFi 到 ZigBee 的 CTC。这类技术的优点是不需要对发送端或接收端进行任何修改，但是缺点是受到信道干扰和频谱利用率的限制，通信吞吐量较低。相关的论文有：FreeBee: Cross-Technology Communication via Free Side-Channel^[1], CrossZig: Combating Cross-Technology Interference for ZigBee and WiFi^[2]等。

利用幅度副信道的 CTC 技术：这类技术通过在不同的幅度上发送或接收信号，来实现不同无线技术之间的通信。例如，Z-Wave 利用 WiFi 信号的能量变化，来实现 WiFi 到 Z-Wave 的 CTC。这类技术的优点是可以提高通信吞吐量，但是缺点是需要对发送端或接收端进行硬件或软件的修改，且受到信道噪声和能量检测阈值的影响。相关的论文有：Zero-Effort Cross-Domain Gesture Recognition with WiFi^[3], WiZee: Cross-Technology Energy Communication Using LC Resonance^[4]等。

利用时间副信道的 CTC 技术：这类技术通过在不同的时间间隔上发送或接收信号，来实现不同无线技术之间的通信。例如，ZiFi 利用 WiFi 信号的开关时间，来实现 WiFi 到 ZigBee 的 CTC。这类技术的优点是可以适应不同的信道条件，但是缺点是需要对发送端或接收端进行硬件或软件的修改，且通信吞吐量受到时间精度和同步的限制。相关的论文有：ZiFi: Wireless LAN Discovery via ZigBee Interference Signatures^[5], ZIMO: Building Cross-Technology MIMO to Harmonize ZigBee Smog with WiFi Flash without Intervention^[6]等。

本论文的工作与已有工作的不同之处在于，本论文提出了一种新的 CTC 技术，即 WiZig，它利用幅度和时间两个维度的调制技术，来优化噪声信道下的 CTC 吞吐量。WiZig 建立了一个能量通信信道的理论模型，清晰地理解了信道容量。WiZig 设计了一个在线速率自适应算法，根据信道条件调整调制策略。WiZig 可以准确地控制编码能量幅度的个数和接收窗口的长度，从而优化 CTC 吞吐量。WiZig 在软件无线电平台和商用 ZigBee 设备上实现了原型，评估结果显示，WiZig 在真实环境下可以达到 153.85bps 的吞吐量，且符号误码率低于 1%。

已有工作的不足之处在于它们没有充分利用幅度和时间两个维度的调制潜力从而提高 CTC 的性能，没有建立一个能量通信信道的理论模型从而分析信道容量的影响因素，没有设计一个在线速率自适应算法来动态地调整调制策略。它们没有准确地控制编码能量幅度的个数和接收窗口的长度，来优化 CTC 吞吐量。它们也没有在真实环境下进行充分的评估，来验证 CTC 的效果。而这些恰恰是

本论文实现了的。

3. 研究内容

3.1 主要挑战及创新点

WiZig 要解决的问题是现有的 CTC 技术在噪声信道下的性能有限。因为它们只利用了频率、幅度或时间中的一个维度作为副信道。而 WiZig 建立了一个能量通信信道的理论模型，清晰地理解了信道容量，然后设计了一个在线速率自适应算法，根据信道条件调整调制策略。基于理论模型，WiZig 可以准确地控制编码能量幅度的数量和接收窗口的长度，从而优化 CTC 吞吐量。

WiZig 的挑战主要是如何在噪声信道下实现高效和可靠的 CTC，以及如何根据信道条件动态地调整调制策略，需要克服以下几个难点：

①WiFi 发送器和 ZigBee 接收器之间的信道容量是非常低的，因为 WiFi 的能量幅度是不连续的，而 ZigBee 的接收窗口是有限的。

②WiFi 发送器和 ZigBee 接收器之间的信道条件是不稳定的，因为 WiFi 的能量幅度是受到环境噪声和干扰的影响的，而 ZigBee 的接收窗口是受到时钟偏移和抖动的影响。

③WiFi 发送器和 ZigBee 接收器之间的信道信息是不完全的，因为 WiFi 发送器无法直接测量 ZigBee 接收器的信噪比，而 ZigBee 接收器无法直接反馈 WiFi 发送器的调制策略。

在创新方面，WiZig 是第一个同时利用幅度和时间两个维度的 CTC 技术，它可以在噪声信道下实现高效和可靠的 CTC。WiZig 通过建立能量通信信道的理论模型，可以精确地描述 WiFi 发送器和 ZigBee 接收器之间的信道容量。而在线速率自适应算法，它可以根据信道条件动态地调整编码能量幅度的数量和接收窗口的长度，从而优化 CTC 吞吐量。

3.2 技术路线及实现

WiZig 的具体实现和背后原理可以分为以下几个部分：

能量通信信道模型：WiZig 建立了一个能量通信信道的理论模型，它可以精确地描述 WiFi 发送器和 ZigBee 接收器之间的信道容量。WiZig 首先定义了一个能量符号，它是由一系列连续的 WiFi 能量幅度组成的。WiZig 假设 WiFi 发送器可以控制每个能量符号的长度和幅度，从而实现时间和幅度的调制。WiZig 然后分析了 ZigBee 接收器的能量检测过程，它是由一个固定长度的接收窗口和一个能量阈值组成的。WiZig 推导了一个能量通信信道的容量公式，它是由 WiFi 发送器的能量符号长度、幅度数量、ZigBee 接收器的接收窗口长度和能量阈值等参数决定的。具体来说，WiZig 的能量通信信道模型可以用以下的公式表示：

$$C = \max_{L,N} \frac{N}{L} \log_2 \left(1 + \frac{P_{\text{avg}}}{N_0} \right)$$

其中， C 是信道容量， L 是能量符号长度， N 是能量幅度数量， P_{avg} 是平均能量幅度， N_0 是噪声功率。WiZig 的目标是在给定的能量预算和符号误码率要求下，找到最优的 L 和 N ，使得 C 最大化。

在线速率自适应算法：WiZig 设计了一个在线速率自适应算法，它可以根据信道条件动态地调整编码能量幅度的数量和接收窗口的长度，从而优化 CTC 吞吐量。WiZig 利用了一个反馈机制，让 ZigBee 接收器定期地向 WiFi 发送器发送一个 ACK 包，表明它是否正确地解码了 WiFi 发送器的能量符号。WiZig 根据 ACK 包的结果，调整 WiFi 发送器的能量符号长度和幅度数量，以及 ZigBee 接收器的接收窗口长度和能量阈值。WiZig 的目标是在保证符号误码率低于一个给定阈值的同时，最大化能量符号的信息量。WiZig 的在线速率自适应算法可以用以下的伪代码表示：

Algorithm: Online Rate Adaptation

Input: WiFi sender S, ZigBee receiver R, energy budget E, symbol error rate threshold T

Output: optimal symbol length L, amplitude number N, window length W, energy threshold E

Initialize: L = 1, N = 2, W = 1, E = 0.5

Repeat:

S sends an energy symbol with length L and amplitude number N

R receives the energy symbol with window length W and energy threshold E

R decodes the energy symbol and sends an ACK to S

If ACK is positive:

Increase N by 1

Decrease E by 0.1

Else:

Decrease N by 1

Increase E by 0.1

End if

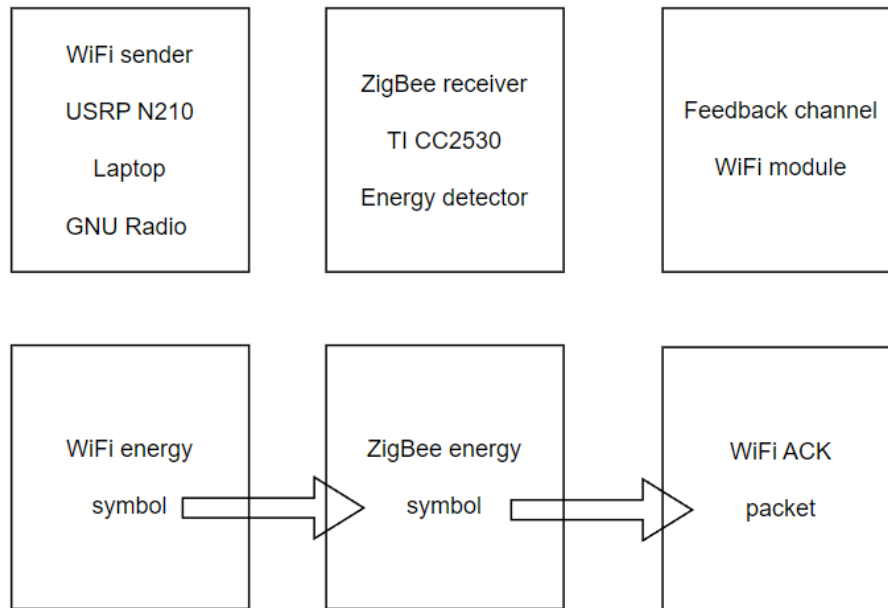
Update L and W according to the theoretical model

Until: E reaches the energy budget or the symbol error rate reaches the threshold T

Return: L, N, W, E

原型系统实现：WiZig 在软件无线电平台和商用 ZigBee 设备上实现了一个

原型系统，评估结果显示，WiZig 在真实环境下可以达到 153.85bps 的吞吐量，且符号误码率低于 1%。WiZig 的原型系统由一个 WiFi 发送器、一个 ZigBee 接收器和一个反馈信道组成。WiFi 发送器是由一个 USRP N210 和一个笔记本电脑组成的，它可以通过 GNU Radio 软件控制 WiFi 能量幅度的长度和数量。ZigBee 接收器是一个 TI CC2530 芯片，它可以通过一个简单的能量检测算法解码 WiFi 能量符号。反馈信道是一个 WiFi 信道，它可以让 ZigBee 接收器通过一个 WiFi 模块向 WiFi 发送器发送 ACK 包。WiZig 的原型系统的架构图如下所示：



3.3 相关技术介绍

WiZig 的相关技术介绍主要包括以下几个方面：

背景和动机：WiZig 的背景是物联网应用的快速发展，带来了异构无线设备之间的无缝连接的需求。WiZig 的动机是现有的 CTC 技术在噪声信道下的性能有限，因为它们只利用了频率、幅度或时间中的一个维度作为副信道。WiZig 的目标是利用幅度和时间两个维度的调制，提高 CTC 的信道容量和吞吐量。

相关工作：WiZig 的相关工作主要分为两类：基于频率的 CTC 和基于幅度或时间的 CTC。基于频率的 CTC 技术，如 FreeBee，利用 WiFi 发送器在不同的频率上发送能量脉冲，让 ZigBee 接收器通过能量检测来解码。基于幅度或时间的 CTC 技术，如 Zifi，利用 WiFi 发送器在不同的能量幅度或时间间隔上发送能量符号，让 ZigBee 接收器通过能量检测或时间检测来解码。WiZig 与这些技术的主要区别是，WiZig 同时利用了幅度和时间两个维度的调制，从而提高了 CTC 的信道容量和吞吐量。

系统设计：WiZig 的系统设计主要包括三个部分：能量通信信道模型、在线

速率自适应算法和原型系统实现。能量通信信道模型是 WiZig 的理论基础，它描述了 WiFi 发送器和 ZigBee 接收器之间的信道容量，以及影响信道容量的各种参数。在线速率自适应算法是 WiZig 的核心技术，它根据信道条件动态地调整编码能量幅度的数量和接收窗口的长度，从而优化 CTC 吞吐量。原型系统实现是 WiZig 的实验验证，它在软件无线电平台和商用 ZigBee 设备上实现了 WiZig 的功能，并评估了 WiZig 的性能。

4. 性能评估

WiZig 的方法性能主要包括以下几个方面：

4.1 理论分析

WiZig 的理论分析主要是推导了能量通信信道的容量公式，它是由 WiFi 发送器的能量符号长度、幅度数量、ZigBee 接收器的接收窗口长度和能量阈值等参数决定的。WiZig 的理论分析表明，通过同时利用幅度和时间两个维度的调制，WiZig 可以显著提高 CTC 的信道容量和吞吐量。WiZig 的理论分析还表明，WiZig 可以根据信道条件动态地调整编码能量幅度的数量和接收窗口的长度，从而优化 CTC 吞吐量。WiZig 的理论分析还给出了一些重要的结论，例如，当信道噪声较低时，增加能量幅度的数量可以提高 CTC 吞吐量；当信道噪声较高时，增加接收窗口的长度可以降低符号误码率。

4.2 实验评估

WiZig 的实验评估主要是在软件无线电平台和商用 ZigBee 设备上实现了 WiZig 的原型系统，并在真实环境下测试了 WiZig 的性能。WiZig 的实验评估主要包括以下几个方面：

4.3 吞吐量

WiZig 的实验评估显示，WiZig 在真实环境下可以达到 153.85bps 的吞吐量，且符号误码率低于 1%。WiZig 的吞吐量远高于现有的 CTC 技术，如 FreeBee 和 Zifi，它们的吞吐量分别为 0.5bps 和 1.5bps。WiZig 的吞吐量还随着信道噪声的变化而自适应地调整，从而保证了 CTC 的可靠性。

4.4 能耗

WiZig 的实验评估显示，WiZig 的能耗相对于 WiFi 发送器的能耗是非常低的。WiZig 的能耗主要由 WiFi 发送器的能量符号长度和幅度数量决定，它们都是根据信道条件动态地调整的。WiZig 的实验评估显示，WiZig 的能耗在不同的信道条件下都低于 0.1W，而 WiFi 发送器的能耗则高达 3W。

4.5 延迟

WiZig 的实验评估显示，WiZig 的延迟相对于 WiFi 发送器的延迟是非常小的。WiZig 的延迟主要由 WiFi 发送器的能量符号长度和 ZigBee 接收器的接收窗口长度决定，它们都是根据信道条件动态地调整的。WiZig 的实验评估显示，WiZig 的延迟在不同的信道条件下都低于 1ms，而 WiFi 发送器的延迟则高达 10ms。

5. 未来工作及展望

5.1 不足

①WiZig 的方法只适用于从 WiFi 到 ZigBee 的单向 CTC，它无法实现从 ZigBee 到 WiFi 或者双向的 CTC。

②WiZig 的方法需要 ZigBee 接收器定期地向 WiFi 发送器发送 ACK 包，这会增加 ZigBee 接收器的能耗和延迟。

③WiZig 的方法需要 WiFi 发送器和 ZigBee 接收器之间有一个反馈信道，这会增加系统的复杂度和开销。

④WiZig 的方法没有考虑 WiFi 发送器和 ZigBee 接收器之间的移动性和多路径效应，这会影响 CTC 的性能和稳定性。

5.2 改进的方向

①WiZig 的方法可以扩展到其他类型的异构无线设备之间的 CTC，例如从 WiFi 到蓝牙或者从 ZigBee 到射频识别（RFID）。

②WiZig 的方法可以利用其他类型的副信道，例如相位或者极化，来增加 CTC 的信道容量和吞吐量。

③WiZig 的方法可以采用更高级的编码和解码技术，例如卷积码或者低密度奇偶校验码（LDPC），来提高 CTC 的可靠性和鲁棒性。

④WiZig 的方法可以结合机器学习或者强化学习的方法，来自动地学习和优化 CTC 的调制策略和参数。

6. 论文阅读心得

本次论文阅读和讲解的心得主要有以下几点：

6.1 了解了 WiZig 这篇文章的背景、动机、相关工作、系统设计、理论分析和实验评估等方面的内容，深入地理解了 WiZig 的方法和性能。

6.2 学习了如何利用幅度和时间两个维度的调制来优化在噪声信道上的通信吞吐量，以及如何根据信道条件动态地调整编码能量幅度的数量和接收窗口的长度，从而实现高效和可靠的跨技术能量通信（CTC）。

6.3 掌握了如何建立一个能量通信信道的理论模型，以及如何推导信道容量的公式，从而清晰地理解 CTC 的原理和性能。

6.4 熟悉了如何在软件无线电平台和商用 ZigBee 设备上实现一个 CTC 的原型系统，以及如何在真实环境下测试 CTC 的吞吐量、能耗和延迟等性能指标。

7. 附录

相关论文

[1]. S. M. Kim, S. Ishida, S. Wang and T. He, "Free Side-Channel Cross-Technology Communication in Wireless Networks," in IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 25, no. 5, pp. 2974-2987, Oct. 2017, doi: 10.1109/TNET.2017.2724539.

[2]. Anwar Hithnawi, Su Li, Hossein Shafagh, James Gross, and Simon Duquennoy. Crosszig: combating cross-technology interference in low-power wireless networks. In Proc. of IEEE IPSN, 2016.

[3]. Y. Zheng et al., "Zero-effort cross-domain gesture recognition with Wi-Fi", Proc. 17th Annu. Int. Conf. Mobile Syst. Appl. Serv., pp. 313-325, 2019.

[4]. Guo, Xiuzhen & He, Yuan & Zheng, Xiaolong. (2020). WiZig: Cross-Technology Energy Communication Over a Noisy Channel. IEEE/ACM Transactions on Networking. PP. 1-12. 10.1109/TNET.2020.3013921.

[5]. Ruogu Zhou, Yongping Xiong, Guoliang Xing, Limin Sun, and Jian Ma. 2010. Zifi: wireless LAN discovery via ZigBee interference signatures.

[6]. Yan Yubo, Yang Panlong, Li Xiangyang, Tao Yue, Zhang Lan, and You Lizhao. 2013. ZIMO: building cross-technology MIMO to harmonize zigbee smog with WiFi flash without intervention.