

# 基于编码拆分的跨网通信技术优化研究

杨 旭,谭子轶,陈朋朋,李 鸣,牛 强,夏士雄

(中国矿业大学计算机科学与技术学院,江苏徐州 221116)

**摘 要:** 现有的 WEBe 系统可通过模拟接收器的标准时域波形在物理层面实现 WiFi 到 ZigBee 的跨网通信,但该系统存在单次传输帧接收率不高,符号错误率较大等局限.针对该局限,本文提出了一种基于循环前缀前的编码拆分优化方案,主要思想是对 ZigBee 前导码中的同步码序列进行编码拆分,可有效降低循环前缀操作时出现的错误,提高帧接收率.结果表明该方案优化系统单次传输的帧接收率可达 65.2%,相比原系统提高了 8.1%,且单次传输的符号错误率从 2.7% 降低至 1.8%.

**关键词:** 跨网通信技术; 循环前缀; 同步码; 编码拆分

中图分类号: TN919

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2021) 07-1274-05

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

DOI: 10.12263/DZXB.20191248

## Optimization Research of Cross-Technology Communication via Split Coding

YANG Xu, TAN Zi-yi, CHEN Peng-peng, LI Ming, NIU Qiang, XIA Shi-xiong

(School of Computer Science and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

**Abstract:** Recently, the WEBe system achieved the one-way communication from WiFi to ZigBee on the physical level by emulating the time-domain signal of receiver. However, there are some shortcomings in WEBe such as short FRR (Frame Receive Rate) of single transmission frames and a large SER (Symbol Error Ratio). In view of the above-mentioned facts, this paper proposes an optimization scheme via split coding before cyclic prefix (CP). The main idea is splitting and coding the synchronization word sequences in ZigBee's preamble. It can reduce the error occurred in the CP operation effectively and improve the FRR. The results show that the maximum FRR can reach 65.2%, which is 8.1% higher than the original system. Furthermore, the SER is reduced from 2.7% to 1.8%.

**Key words:** cross-technology communication(CTC); cyclic prefix(CP); synchronization word; split coding

### 1 引言

随着各种物联网应用的发展,到了2020年在物联网中的无线异构设备的数量将超过200亿,无线技术的大量共存会导致信号相互之间产生干扰<sup>[1]</sup>,对通信产生影响.无线频谱是有限的,不同无线技术的通信频段重叠会产生同频干扰.传统无线异构设备间通信通常采用网关设备作为信息转换器,但该方法存在着局限性,如部署网关前需要考虑各无线网络之间的通信距离、需要控制经过网关的流量、需要提前部署网关设备等,这需要一定的时间和成本,并且移动性和灵活性较差.

针对上述问题,跨网通信技术应运而生.跨网通信

技术是一项新兴的通信技术,它的普遍定义是通过某些技术手段让无线异构设备之间可以直接进行消息和数据交换<sup>[1]</sup>.绝大部分的跨网通信技术为了信道协调性,都需要在无线异构设备之间交换 RTS / CTS<sup>[2,3]</sup>.早期的跨网通信技术需要发送虚拟包<sup>[4,5]</sup>,但是发送虚拟包占用了信道资源,导致通信效率不高<sup>[6,7]</sup>.现有的跨网通信技术主要是通过使用分组级调制<sup>[8,9]</sup>对数据包进行修改,再由接收器进行接收解码.研究学者通过检测 WiFi AP 并使用低功率 ZigBee 无线信号唤醒 WiFi 设备,显著降低了设备的待机能量<sup>[10]</sup>. Kim 等人提出了名为 FreeBee<sup>[11]</sup>的跨网通信技术,通过调整 WiFi 帧间间隔,减少了超过 50% 的发送数据能量. Z Yin 等人提出

使用一系列长短不一的 WiFi 包构造 Morse 码<sup>[12]</sup>,并在接收器端通过 RSSI 能量感测解码实现跨网通信. 文献 [13]提出了一种交叉解码方式实现跨网通信. 而在 Mobicom 2017上发表的一项被命名为 WEBee<sup>[14]</sup>的跨网通信技术是第一项在物理层面上实现的跨网通信技术,使用这项技术通过重传可以在嘈杂环境中实现 WiFi 和 ZigBee 之间 99% 以上的可靠并行跨网通信. 虽然 WEBee 能实现从 WiFi 到 ZigBee 上的直接通信,但是该系统仍存在着单次传输下帧接收率不高、符号错误率较高等不足.

为了改善 WEBee 系统存在的不足,本文分析了 WEBee 系统的不足,以 WEBee 系统为基础设计了一个优化系统,介绍了优化系统的工作流程,提出了一种基于循环前缀前的编码拆分优化方案,该方案有效提高了系统的帧接收率并且降低了符号错误率. 实验证明优化系统单次传输的帧接收率在走廊可达 65.2%,相比原系统提高了 8.1%,单次传输的符号错误率从 2.7% 降低至 1.8%. 因此,本文的创新点如下:

(1)对 WEBee 系统进行分析,分析了系统的不足并指出了系统存在的缺陷.

(2)对 ZigBee 传输的数据特点进行了分析,结合循环前缀的特点,提出了一种基于循环前缀前的编码拆分优化方案. 优化系统相比于原型系统有效提高了帧接收率、吞吐量以及降低了符号错误率.

(3)使用了装载有 Atheros AR2425 无线网卡的笔记本作为发射器以及 RF-CC2430 芯片节点作为接收器,在走廊改变不同的参数分别进行对比实验,在不同角度上对优化系统的性能进行实验验证.

## 2 WEBee 分析

WEBee 系统虽然能实现 WiFi 到 ZigBee 的直接通信,但是系统具有一些不足. 其产生的模拟 ZigBee 数据主要有 2 种类型的错误,分别是 QAM 仿真错误和循环前缀错误.

(1)QAM 仿真错误. 构造模拟的 ZigBee 数据时,需要将 ZigBee 时域信号映射到 QAM 星座点中. 但是预设 QAM 星座点是有限且离散的, ZigBee 时域信号无法完美地映射到预设的 QAM 星座点上. 当 ZigBee 接收器解调仿真信号时,会出现量化误差. 这种量化误差如下所示:

$$\int_{-T/2}^{T/2} |u(t) - v(t)|^2 dt = T \sum_k |U[k] - V[k]|^2 \quad (1)$$

其中  $u(t)$  是初始时域信号,  $v(t)$  是经过量化之后的时域信号,  $U[k]$  和  $V[k]$  是对应经过傅里叶逆变换的时域信号. 该错误可通过汉明码等手段纠错.

(2)循环前缀错误. WiFi 通信需要进行循环前缀,

ZigBee 通信则不会执行. 因此使用循环前缀会导致模拟信号前端发生失真,由于信号是预定义的且 WiFi 传输是一个固定的过程,因此上述的错误无法避免.

为了更好地减少循环前缀错误,本文提出了一种基于循环前缀前的编码拆分优化方案,有效地提升了系统性能.

## 3 优化系统设计

### 3.1 构造 WiFi 数据的工作流程

优化系统的工作流程图如图 1 所示. 系统构造具有模拟 ZigBee 时域波形的 WiFi 数据,通过 WiFi 发送到 ZigBee, ZigBee 对数据进行解码得到正确的 ZigBee 数据. 构造具有模拟 ZigBee 信号的 WiFi 数据的流程如图 1 的下半部分所示,步骤如下:

(1)将 ZigBee 数据封装成能被 ZigBee 设备识别的时域波形.

(2)使用基于循环前缀前的拆分优化算法对时域波形进行处理,得到同步码序列最优的时域波形,该部分具体流程见第 4 节.

(3)时域波形经过快速傅里叶逆变换 (IFFT) 并量化处理,映射为一系列的星座点. 快速傅里叶逆变换如式 (2) 所示,其中  $x(n)$  为  $N$  项的复数序列.

(4)经过 IFFT 处理得到的星座点与预设星座点进行比较筛选,选择与预设星座点总欧几里德距离最小的星座点,得到可控制相应 ZigBee 数据的星座点. 计算星座点之间的欧几里得距离如式 (3) 所示.

$$X(n) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{nk}, k = 0, \dots, N - 1 \quad (2)$$

$$\rho = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (3)$$

其中  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$  分别为处理后星座点和预设星座点两点的坐标.

(5)星座点通过星座映射表得到相应的编码位. 通过编码位映射表得到相应的具有模拟 ZigBee 信号的 WiFi 数据.

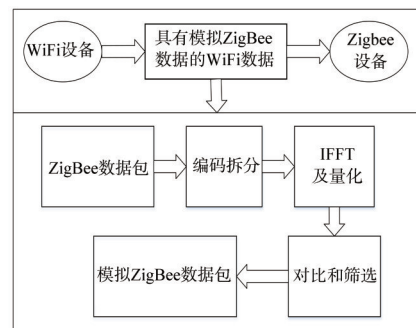


图 1 优化系统工作流程

#### 4 编码拆分优化算法设计与分析

在 ZigBee 通信中, ZigBee 数据首先需要通过前导码检测. 前导码由一系列的 0 和 6 位的同步码组成, 提高检测精度需要在 ZigBee 同步码进行. 在循环前缀操作后, 模拟 ZigBee 数据的同步码可能发生改变, 假设 ZigBee 的同步码序列是 001111, 执行循环前缀后, 序列将变成 111111, 引起 2 个错误.

本文设计了一种编码拆分算法, 关键思想是将 ZigBee 同步码进行拆分. 如图 2 所示, 假设同步码的原始序列为 001111, 同步码 001111 可拆分成 0011 和 11 两部分, 将两部分重新组合编码为序列 110011. 该序列在进行循环前缀操作时前缀和后缀相同, 因此对于原始序列 001111 可以完全避免该错误.

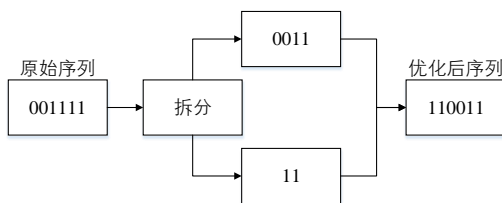


图2 循环前缀错误去除示例

虽然并不是所有的同步码都能找到一个合适组合序列完全去除循环前缀错误, 但是能从有限个同步码拆分组合序列中找到最优的组合序列. 本文使用贪心算法寻找拆分后最优的一个序列组合, 选择原则是序列经过循环前缀处理后, 具有的错误最少且信号功率尽可能大, 优化方案主要流程如下:

(1) 将 ZigBee 数据封装成能被 ZigBee 设备识别的时域波形. 对 ZigBee 数据进行前导码检测, 得到数据的同步码. 假设 6 位同步码 Sym 的序列如下所示:

$$\text{Sym} = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\} \quad (4)$$

(2) 对得到的数据同步码进行拆分, 枚举并记录下所有可能出现的序列情况. 并对每个序列进行标注, 假设得到  $n$  个同步码  $S(k_n)$  组成的序列  $C(n)$  如下所示.

$$C(n) = \{S(k_1), S(k_2), S(k_3), \dots, S(k_n)\} \quad (5)$$

(3) 编码所有序列形成的有限个同步码组合, 使用贪心算法筛选所有组合中最优的序列用于数据的发送. 具体步骤如下:

(a) 对每个序列进行 CP 处理, 得到处理后的序列  $R(k_n)$  和功率  $P(k_n)$ , 分别如式 (6) 和 (7) 所示, 其中  $N$  为符号长度,  $L$  为使用 CP 部分的长度.

$$R(k_n) = \sum_{m=0}^L S(k_n + m) S^*(k_n + m + N) \quad (6)$$

$$P(k_n) = \sum_{m=0}^L S(k_n + m) S^*(k_n + m) \quad (7)$$

(b) 将得到的  $R(k_n)$  和  $P(k_n)$  分别与初始同步码进行

对比, 获得处理后序列的 CP 错误差序列  $CC(n)$  和功率差序列  $PC(n)$  分别如式 (8) 和 (9) 所示, 其中  $\Delta CP(k_n)$  表示各序列具有的 CP 错误与原始序列的差值,  $\Delta P(k_n)$  表示处理后序列的功率与原始序列的差值. 选用  $\Delta CP(k_n)$  尽可能小与  $\Delta P(k_n)$  尽可能大的序列用于发送.

$$CC(n) = \{\Delta CP(k_1), \Delta CP(k_2), \Delta CP(k_3), \dots, \Delta CP(k_n)\} \quad (8)$$

$$PC(n) = \{\Delta P(k_1), \Delta P(k_2), \Delta P(k_3), \dots, \Delta P(k_n)\} \quad (9)$$

(4) ZigBee 接收器根据编码表进行同步码还原, 解码得到原始的 ZigBee 帧.

#### 5 实验评估

本文对优化系统进行了实验验证, 实验环境为走廊环境, 使用了装载有 Atheros AR2425 无线网卡的笔记本作为发射器, RF-CC2430 节点作为接收器. 如图 3 所示. 为了保证实验的可靠性, 本文取 10 次实验的平均值作为实验结果, 每次实验一共发送 100 个数据帧, 并把实验结果与另一种跨网通信技术 FreeBee 系统作对比. 实验主要测定系统的性能指标为帧接收率 (FRR) 和符号错误率 (SER).



图3 实验设备及实验环境图

图 4、图 5 分别表示了在不同传输次数下 WEBe 系统与优化系统的 FRR 和 SER 对比直方图. 由图可得, 相同条件下, 优化系统的性能都优于 WEBe 系统, 单次传输下 FRR 提高了 8.1%, 且 SER 减少了 0.9%. 实验证

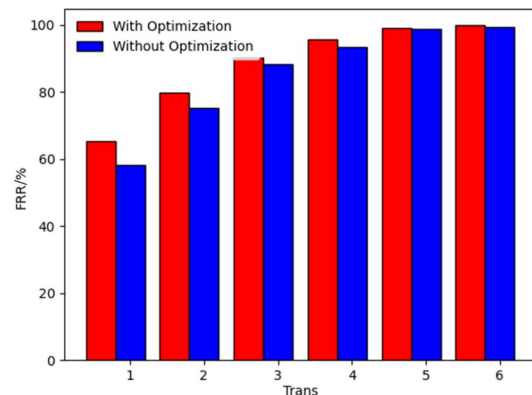


图4 系统FRR对比图

明系统性能得到明显的提高.

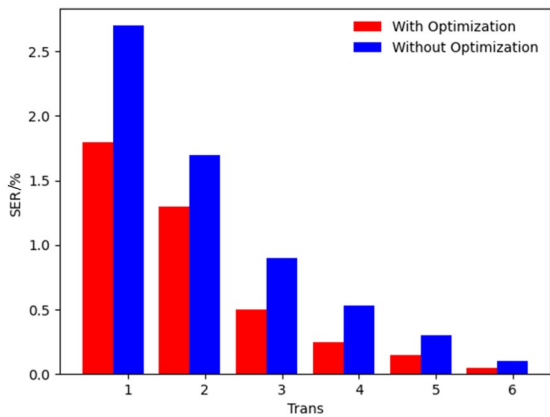


图5 系统SER对比图

本文测定了走廊单次传输时不同传输距离的系统FRR与SER,实验结果如图6和图7所示.由图可得,传输距离为2m~10m,优化系统在走廊可以实现高于56.4%的FRR以及低于2.6%的SER,均优于相同条件下的WEBee系统和FreeBee系统.

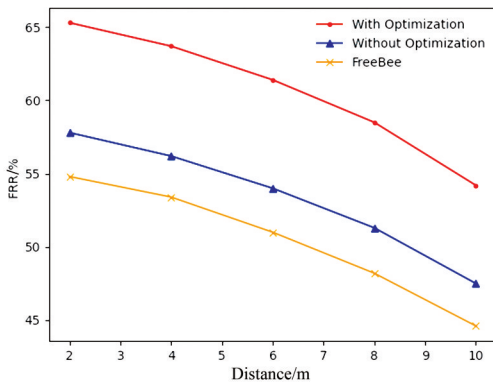


图6 走廊单次传输系统FRR对比图

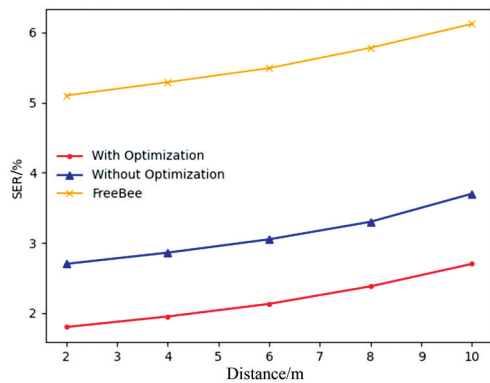


图7 走廊单次传输系统SER对比图

在以上的实验中,实验环境皆为静态环境.为了保证实验准确性和可靠性,本文固定接收器的位置,保持收发器之间的距离不变,通过改变发射器的移动速度,

在动态环境下测量计算走廊环境中系统单次传输的FRR,实验结果如图8所示.由图可知,在不同的移动速率下,系统的FRR基本保持不变,该实验证明了动态环境对优化系统基本不会产生影响.

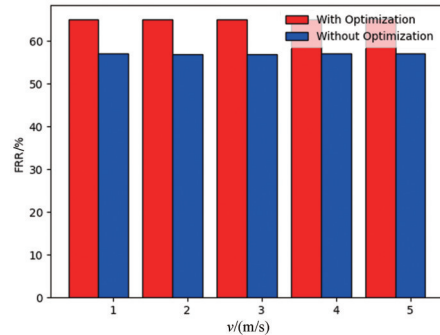


图8 不同速率下走廊单次传输系统FRR对比图

考虑到多径效应对通信的影响,本文让不同人数的志愿者在信道之间来回走动,以此设置了一个多径效应较强的环境进行实验测定系统的性能.本文在不改变传输距离的情况,通过改变发射器与接收器之间的行走人数反映多径效应的强弱,测量单次传输下走廊环境中不同多径效应系统FRR与SER,实验结果如图9和图10所示.

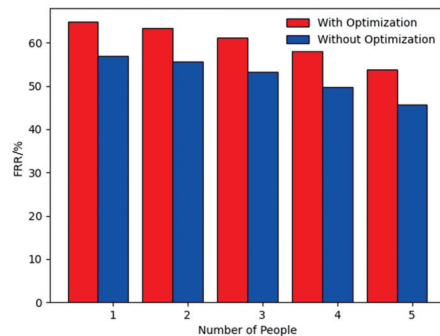


图9 不同人数下走廊单次传输系统FRR对比图

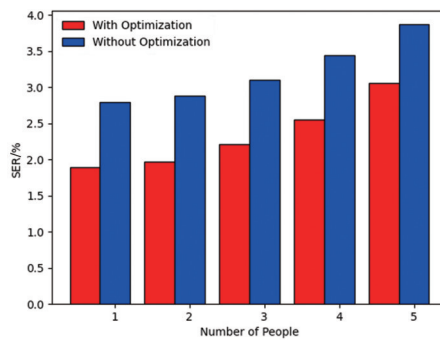


图10 不同人数下走廊单次传输系统SER对比图

由图可得,多径效应会较为显著地影响系统的性能,在相同条件下,优化系统的FRR与SER都仍要优于原始WEBee系统,实验证明优化系统在多径较为丰富

的环境下仍能正常工作,性能相比原系统得到了提升.

## 6 总结

本文对分析了 WEBe 系统的不足,提出了一种基于循环前缀前的编码拆分优化方案,设计了优化系统,并通过实验验证优化效果. 实验证明该方案可以提高系统的帧接收率和减少符号错误率. 系统单次传输的帧接收率相比 WEBe 系统提高了 8.1%, 单次传输的符号错误率由 2.7% 减少到 1.8%. 在不同传输距离以及不同多径环境的条件下,优化系统的性能都优于 WEBe 系统.

### 参考文献

- [1] Zheng X, He Y, Guo X. StripComm: Interference-resilient cross-technology communication in coexisting environments [A]. IEEE INFOCOM 2018—IEEE Conference on Computer Communications [C]. New York: IEEE, 2018. 171–179.
- [2] Zhang X, Shin K G. Enabling coexistence of heterogeneous wireless systems: Case for ZigBee and WiFi [A]. Proceedings of the Twelfth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing [C]. New York: ACM, 2011. 6.
- [3] Bloessl B, Segata M, Sommer C, et al. An IEEE 802.11 a/g/p OFDM receiver for GNU radio [A]. Proceedings of the Second Workshop on Software Radio Implementation Forum [C]. New York: ACM, 2013. 9–16.
- [4] Shangguan L, Yang Z, Liu A X, et al. STPP: Spatial-temporal phase profiling-based method for relative RFID tag localization [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2016, 25(1): 596–609.
- [5] Guo X, Zheng X, He Y. Wizig: Cross-technology energy communication over a noisy channel [A]. IEEE INFOCOM 2017 IEEE Conference on Computer Communications [C]. New York: IEEE, 2017. 1–9.
- [6] Zhang Y, Li Q. Howies: A holistic approach to zigbee assisted wifi energy savings in mobile devices [A]. Proceedings of IEEE INFOCOM 2013 [C]. New York: IEEE, 2013. 1366–1374.
- [7] Chi Z, Li Y, Sun H, et al. B2w2: N-way concurrent communication for IoT devices [A]. Proceedings of the 14th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems CD-ROM [C]. New York: ACM, 2016. 245–258.
- [8] Chebrolu K, Dhakne A. Esense: Communication through energy sensing [A]. Proceedings of the 15th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking [C]. New York: ACM, 2009. 85–96.
- [9] Jiang W, Yin Z, Kim S M, et al. Transparent cross-technology communication over data traffic [A]. IEEE INFOCOM 2017 IEEE Conference on Computer Communications [C]. New York: IEEE, 2017. 1–9.
- [10] Zhou R, Xiong Y, Xing G, et al. Zifi: wireless LAN discovery via ZigBee interference signatures [A]. Proceedings of the Sixteenth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking [C]. New York: ACM, 2010. 49–60.
- [11] Kim S M, He T. Freebee: Cross-technology communication via free side-channel [A]. Proceedings of the 21st Annual International Conference on Mobile Computing and Networking [C]. New York: ACM, 2015. 317–330.
- [12] Yin Z, Jiang W, Kim S M, et al. C-morse: Cross-technology communication with transparent morse coding [A]. IEEE INFOCOM 2017—IEEE Conference on Computer Communications [C]. New York: IEEE, 2017. 1–9.
- [13] Jiang W, Kim S M, Li Z, et al. Achieving receiver-side cross-technology communication with cross-decoding [A]. Proceedings of the 24th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking [C]. New York: ACM, 2018. 639–652.
- [14] Li Z, He T. Webee: Physical-layer cross-technology communication via emulation [A]. Proceedings of the 23rd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking [C]. New York: ACM, 2017. 2–14.

### 作者简介



杨旭男, 1995年2月出生, 江苏徐州人. 现为中国矿业大学计算机科学与技术学院讲师. 研究方向为跨网通信技术、无线感知、物联网.

E-mail: yang\_xu@cumt.edu.cn



谭子轶男, 1995年10月出生, 广东清远人. 2018年本科毕业于中国矿业大学网络工程系, 现为中国矿业大学计算机应用与技术硕士研究生, 研究方向为跨网通信技术.

E-mail: tanzy@cumt.edu.cn



陈朋朋(通信作者)男, 1983年11月出生, 于山东省济宁市. 现为中国矿业大学计算机科学与技术学院教授、博士生导师, 研究方向为传感器网络、大数据等.

E-mail: chenp@cumt.edu.cn