

空闲信道评估对 ZigBee 与 Wi-Fi 共存的影响研究

黄 仁, 晏政双

(重庆大学 计算机学院, 重庆 400044)

摘要: 为了提高 ZigBee 与 Wi-Fi 共存时的工作效率,以 ZigBee 的吞吐量为评估标准,对不同空闲信道评估模式对 ZigBee 与 Wi-Fi 共存的影响进行了研究。实验结果表明,在不同的情况下选择合适的空闲信道评估模式能够提高 ZigBee 的性能。

关键词: ZigBee; Wi-Fi; 空闲信道评估; 共存; 吞吐量

中图分类号: TP393

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2013)09-2843-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.09.072

Research on impact of clear channel assessment on coexistence of ZigBee and Wi-Fi

HUANG Ren, YAN Zheng-shuang

(College of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to improve the working efficiency of ZigBee, this paper chose ZigBee throughput as the standard to assess the effect of clear channel assessment mode on the coexistence of ZigBee and Wi-Fi. Experiment results show that ZigBee performance can be optimized by choosing suitable clear channel assessment mode.

Key words: ZigBee; Wi-Fi; clear channel assessment; coexistence; throughput

近年来,随着信息社会经济的快速发展,无线局域网(WLAN)技术和无线个域网(WPAN)技术得到了迅猛发展,两者共存的现象越来越普遍。2.4 GHz 频段作为特殊的 ISM 频段,其使用不仅是免费的而且是免许可的,得到了广泛的使用并由此造成了该频段的拥堵。2012 年 11 月发生在深圳的地铁被 Wi-Fi 逼停的事件,经调查就是因为地铁信号受到乘客携带的便携式 Wi-Fi 的干扰所致,因为地铁信号与 Wi-Fi 都工作在 2.4 GHz 频段。日常生活中,以 ZigBee^[1]为代表的 WPAN 设备和以 Wi-Fi 为代表的 WLAN 设备越来越常见,两者共存的现象也越来越普遍,因此必然会产生冲突,从而导致通信效率的下降。国内外很多专家对 2.4GHz 频段下 ZigBee 和 Wi-Fi 的共存问题进行了研究^[2-9]。Sikora 等人^[8]对 IEEE 802.15.4 与蓝牙、IEEE 802.11b 等其他系统之间的相互影响进行了研究。Shin 等人^[9]对 ZigBee 在 WLAN 和蓝牙的干扰下分组错误率的变化情况进行了分析。本文从空闲信道评估(CCA)的角度出发,对 ZigBee 和 Wi-Fi 的共存进行了模拟和研究。

1 ZigBee 和 Wi-Fi 主要特性比较

ZigBee 是基于 IEEE 802.15.4 的无线个域网协议^[10],它具有自组织、短距离、低成本、低功耗、低复杂度、低传输速率的特点,广泛应用于家庭控制、智能抄表、医疗监护、环境监测等领域。IEEE 802.11b 定义了 Wi-Fi 的物理层和 MAC 层,它是目前广泛使用的无线局域网标准。ZigBee 和 Wi-Fi 的主要特性如表 1 所示。

表 1 ZigBee 与 Wi-Fi 的主要特性

特性	ZigBee	Wi-Fi
传输距离	70 ~ 300 m	100 m
速率	20 ~ 250 kps	11 Mbps
频段	868 MHz ~ 2.4 GHz	2.4 GHz
节点数	65000	50
联网所需时间	30 ms	3 s
功耗	很低	高
网络扩展性	自动扩展	无
复杂性	低	非常复杂
使用成本	低	高

2 冲突原理

如图 1 所示,在 2.4 GHz ISM 频段,Wi-Fi 有 11 个直扩信道,每个信道的带宽为 22 MHz,其中有 3 个不重叠的信道;而 ZigBee 一共有 16 个信道,信道编号 k 从信道 11 到信道 26,中心频率为 $2405 + 5(k - 11)$ GHz,每个信道的带宽为 2 MHz,信道间隔为 5 MHz。当 ZigBee 与 Wi-Fi 工作在同一区域时就会对彼此产生干扰。对 Wi-Fi 来说,来自 ZigBee 的干扰属于窄频带的干扰,通过使用扩频技术获得的处理增益可以大大减少干扰带来的影响;而 Wi-Fi 对 ZigBee 的干扰属于宽频带的干扰,有 4 个 ZigBee 信道落在 Wi-Fi 信道的频带间距上,这些间距上的能量比信道内的能量低,因此 ZigBee 选择这些信道时能够将系统间的干扰降至最小。若 Wi-Fi 工作在其中的某一信道,则 ZigBee 信道与其信道重叠的概率为 1/4,这时容易产生带内有色噪声干扰,造成冲突。本文用信号与干扰加噪声比(SINR)来表示 Wi-Fi 对 ZigBee 的影响,其他的影响因素如频

收稿日期: 2012-11-27; 修回日期: 2013-01-11

作者简介: 黄仁(1962-),男,重庆人,副教授,主要研究方向为无线传感器网络、嵌入式应用技术(huangrcqu@163.com);晏政双(1986-),男,硕士,主要研究方向为嵌入式系统及应用。

偏、ZigBee 与 Wi-Fi 之间的距离等都可以在 SINR 中得到反映。

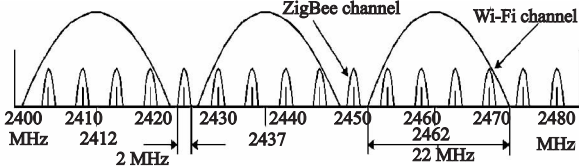


图1 2.4 GHz频段ZigBee和Wi-Fi的信道分布

3 无干扰时 ZigBee 吞吐量分析

本文以 ZigBee 的吞吐量为评估标准,对不同 CCA 模式对 ZigBee 与 Wi-Fi 共存的影响进行评估。为了对比,本文首先推导出在没有 Wi-Fi 干扰的情况下 ZigBee 的吞吐量。考虑由两个 ZigBee 节点构成的星型系统,其中末端节点不断地向 ZigBee 协调器发送数据。ZigBee 使用非信标方式进行通信,即使使用基于非时隙的 CSMA/CA,其流程如图 2 所示。为了方便起见,没有使用确认帧(ACK)。如图 3 所示,相继发送的帧之间有一个帧间间隔(IFS)的规定,其长度与前一个帧是长帧还是短帧有关。本文只考虑长帧的情况,因此帧间间隔为 LIFS,将其设置为 macMinLIFS Period,长度为 40 个符号时间。

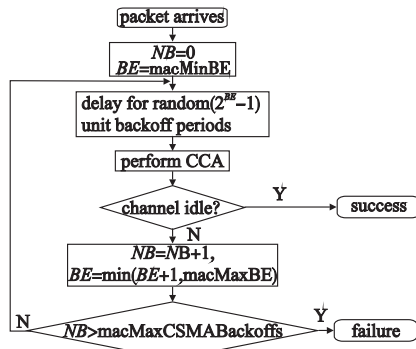


图2 CSMA/CA 算法流程

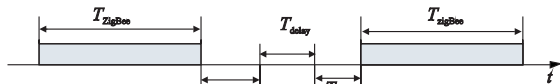


图3 ZigBee发送时序

因此,可以得到 ZigBee 的吞吐量 TH 为

$$TH = \frac{N_{\text{payload bits}}}{LIFS + T_{\text{delay}} + T_{\text{CCA}} + T_{\text{ZigBee}}} \quad (1)$$

其中: $N_{\text{payload bits}}$ 为 ZigBee MAC 静荷的比特数; T_{delay} 、 T_{CCA} 和 T_{ZigBee} 分别为延时时间、CCA 执行时间和 ZigBee 报文的传送时间。一个 T_{CCA} 等于 8 个符号时间。而

$$T_{\text{ZigBee}} = T_{\text{overhead bits}} + T_{\text{payload bits}} \quad (2)$$

其中: $T_{\text{overhead bits}}$ 和 $T_{\text{payload bits}}$ 分别为 ZigBee 报文头(本文中特指除 MAC 净荷以外的其他部分)和 MAC 静荷的传输时间。因此有

$$TH = \frac{N_{\text{payload bits}}}{LIFS + T_{\text{delay}} + T_{\text{CCA}} + \frac{N_{\text{overhead bits}}}{B_{\text{rate}}} + \frac{N_{\text{payload bits}}}{B_{\text{rate}}}} \quad (3)$$

式中, $N_{\text{overhead bits}}$ 为 ZigBee 报文头比特数。在 2.4 GHz 频段,ZigBee 的比特速率和符号速率分别为 250 kbps 和 62.5k symbol/s。由此可以得出: $LIFS = 0.625$ ms, $T_{\text{CCA}} = 0.125$ ms。故式(3)可化为

$$TH = \frac{1}{0.75 + T_{\text{delay}} + \frac{N_{\text{overhead bits}}}{250 \times 1.024} + \frac{1}{N_{\text{payload bits}} \times 250 \times 1.024}} \quad (4)$$

$$TH = \frac{1}{0.75 + T_{\text{delay}} + \frac{N_{\text{overhead bits}} \times 0.0039}{N_{\text{payload bits}}} + 0.0039} \quad (5)$$

在执行 CCA 之前 ZigBee 节点会随机延时 $0 \sim (2^{BE} - 1)$ 个退避时期,一个退避时期等于 20 个符号时间。而由前面的假设可以知道,当执行 CCA 时,信道总是空闲的,因此 BE 始终维持在 macMinBE , T_{delay} 服从 $0 \sim (2^{\text{macMinBE}} - 1)$ 的均匀分布。因此可以得到 T_{delay} 的均值为

$$E(T_{\text{delay}}) = \frac{(2^{\text{macMinBE}} - 1) + 1}{2} \text{ unit backoff periods} \quad (6)$$

取 macMinBE 的默认值 3,故有

$$E(T_{\text{delay}}) = 4 \text{ unit backoff periods} = 1.25 \text{ ms} \quad (7)$$

代入式(5)有

$$TH = \frac{1}{2 + \frac{N_{\text{overhead bits}} \times 0.0039}{N_{\text{payload bits}}} + 0.0039} \quad (8)$$

根据前面的假设,本文只考虑一个 ZigBee 末端节点向协调器发送数据的情况,因此根据 IEEE 802.15.4 标准^[10],MAC 数据帧的地址域字段为 10 Byte,整个 MAC 数据帧除净荷外有 15 Byte,包括帧控制域、序列号、地址域和 FCS 字段。而物理层的 PSDU 最大可以为 127 Byte,因此 MAC 净荷最大为 112 Byte。同时由于是长帧,MPDU 大于 18 Byte,于是 $24 < N_{\text{payload bits}} \leq 896$ 。物理层帧同步头、帧头共有 6 Byte,所以 ZigBee 报文头总共有 21 Byte。 $N_{\text{payload bits}} = 168$ bit。

最后,式(8)可转换为

$$TH = \frac{1}{\frac{2.6552}{N_{\text{payload bits}}} + 0.0039} \quad (9)$$

式(9)表示了在没有 Wi-Fi 干扰的情况下,ZigBee 的吞吐量随 ZigBee MAC 静荷的变化情况,如图 4 所示。从图中可以看到,随着 MAC 静荷的增大,ZigBee 的吞吐量逐渐增大,当 MAC 净荷取最大值 112 Byte 时,ZigBee 的吞吐量约为 145 kbps,该值为理论上的最大值。

4 共存模拟与评估

4.1 仿真描述

ZigBee 与 Wi-Fi 的共存如图 5 所示。如前所述,本文以 ZigBee 的吞吐量为评估对象,对 ZigBee 和 Wi-Fi 分别采用不同 CCA 模式的情形进行模拟和评估。

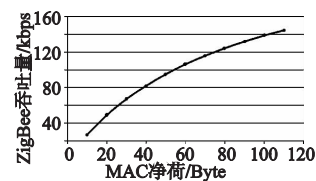


图4 ZigBee吞吐量随MAC静荷变化

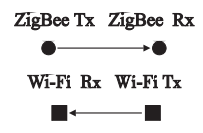


图5 ZigBee与Wi-Fi共存图

本文在 MATLAB 上对其进行模拟并使用了文献[10]附录 E 中的反映 BER 与 SINR 关系的曲线图。ZigBee MAC 净荷大小设置为 112 Byte,其余参数使用默认值。在模拟中,SINR 是不断变化的,BER 也随之变化,由此导致 ZigBee 吞吐量也随之变化。这里 ZigBee 吞吐量用正确收到的包的 MAC 净荷比特数与模拟持续时间的比值来确定,即

$$TH' = \frac{n \times \text{payload bits}}{T} \quad (10)$$

其中: n 为正确收到的包的个数, T 为模拟所用时间。因为没有使用错误校正,所以只有全部的比特都正确时才认为这个包是正确接收的。

4.2 主要的假设

ZigBee 和 Wi-Fi 在执行 CSMA/CA 时采用的 CCA 模式有以下三种^[10]:

a) CCA 模式 1. 能量高于门限值。在检测到能量高于 ED 门限值时就报告媒介忙。

b) CCA 模式 2. 仅仅载波侦听。在检测到一个已调制和扩频的信号时, CCA 就报告媒介忙, 这个信号的能量可能高于也可能低于 ED 门限值。

c) CCA 模式 3. 能量高于门限值的载波侦听。当检测到一个能量高于 ED 门限值的调制和扩频信号时, CCA 就报告媒介忙。

由于只考虑图 5 所示的情况, 可以有如下假设:

a) ZigBee 和 Wi-Fi 之间的距离足够近以便双方都可以检测到对方的信号。

b) ZigBee 节点使用 CCA 模式 2 和 CCA 模式 3 进行空闲信道评估时, 信道总是空闲的, 因此 CCA 模式 2 和 CCA 模式 3 可以合并为一种情况考虑, 这里称之为载波侦听模式 (CS 模式)。CCA 模式 1 称之为能量检测模式 (ED 模式)。

4.3 仿真结果及评估

当 Wi-Fi 使用不同的 CCA 模式时, ZigBee 分别采用 CS 模式和 ED 模式获得如下数据。

4.3.1 Wi-Fi 使用 CS 模式

在这种情况下, Wi-Fi 数据的传输与 ZigBee 的操作无关, 随着 SINR 的变化, 获得的 ZigBee 吞吐量如图 6 所示。从图中可以看到, 以 -3 dB 为界, ZigBee 的吞吐量呈现出明显变化。

a) 当 $\text{SINR} < -3 \text{ dB}$ 时, ZigBee 的吞吐量很低。这是因为在这个区域 BER 非常高。不管 ZigBee 采用的是 CS 模式还是 ED 模式都只有在 Wi-Fi 没有传送数据时才能够接收到正确的数据包。但是, 虽然吞吐量相差不大, 对 ZigBee 设备来说, ED 模式还是比 CS 模式更有优势。因为在 ED 模式下, 当 ZigBee 检测到 Wi-Fi 在传送数据时会延时一段时间, 在此模式下数据传送的次数比 CS 模式下传送数据的次数更少, 因此可以节省很多能量消耗, 对像 ZigBee 这种低功耗的设备来说是非常重要的。

b) 当 $\text{SINR} > -3 \text{ dB}$ 时, 随着 BER 的下降, 相应的 PER 也随之下降, ZigBee 的吞吐量趋于稳定。在 CS 模式下, ZigBee 的吞吐量维持在 145 kbps 上下, 这与前面无干扰情况下推导出的吞吐量大致相同; ED 模式下则为 122 kbps, 因为 ED 模式下数据传送的次数要比 CS 模式少。在 ED 模式下, 当 Wi-Fi 在传送数据时, 若 ZigBee 检测到能量高于门限值则不会传送数据, 即使 Wi-Fi 不影响 ZigBee 数据的接收, 因此 ZigBee 的吞吐量比在 CS 模式下更低。在此区间, CS 模式比 ED 模式能够获得更大的吞吐量。

4.3.2 Wi-Fi 使用 ED 模式

在这种情况下, Wi-Fi 数据的传输受 ZigBee 操作的影响, 随着 SINR 的变化, ZigBee 的吞吐量变化情况如图 7 所示。

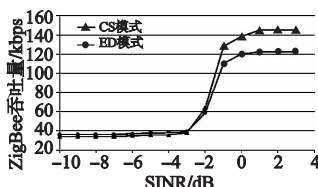


图6 Wi-Fi使用CS模式时 ZigBee的吞吐量

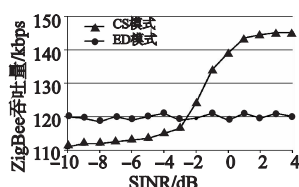


图7 Wi-Fi使用ED模式时 ZigBee的吞吐量

a) ZigBee 使用 ED 模式时, 其吞吐量维持在 120 kbps 上

下。这是因为 ZigBee 和 Wi-Fi 同时使用 ED 模式, 两者发送数据之前都要进行能量检测, 发现对方在发送时会延时一段时间, 因此发生碰撞的次数大大降低。

b) ZigBee 使用 CS 模式时, 其传输不受 Wi-Fi 的影响。因此当 SINR 较小时, 发生碰撞的次数较多, ZigBee 的吞吐量较小, 此时使用 ED 模式更好。但是随着 SINR 的增大, 碰撞的影响降低, ZigBee 的吞吐量逐渐增大, 最终达到 145 kbps。ZigBee 使用 ED 模式时, 当其检测到 Wi-Fi 时会延迟传输, 因此当 SINR 较大时, 使用 CS 模式获得的吞吐量远比 ED 模式大。

4.4 结论

由实验结果可以看到: a) 当 $\text{SINR} < -3 \text{ dB}$ 时, 无论 Wi-Fi 采用何种 CCA 模式, ZigBee 使用 ED 模式都能获得更好的效率, 当 Wi-Fi 使用 CS 模式时, 虽然 ZigBee 吞吐量与使用 CS 模式时相差不大, 但是由于传输次数少, 避免了不必要的能量消耗, 当 Wi-Fi 使用 ED 模式时, ZigBee 使用 ED 模式能获得比使用 CS 模式更大的吞吐量; b) 当 $\text{SINR} > -3 \text{ dB}$ 时, 无论 Wi-Fi 采用何种 CCA 模式, ZigBee 使用 CS 模式都能获得更大的吞吐量。

5 结束语

不同的空闲信道评估模式对 ZigBee 与 Wi-Fi 的共存有着不同的影响, 本文以 ZigBee 吞吐量为评估标准对其进行了模拟与评估。实验结果表明, 当 Wi-Fi 使用某种模式的 CCA 时, 根据不同的 SINR, ZigBee 使用不同 CCA 模式获得的吞吐量有很大的差异; 而当差异不大时, 选择合适的 CCA 模式又可以节省更多的能源, 由此可以根据具体的环境选择合适的 CCA 模式来提高两者的共存。

参考文献:

- [1] 吕治安. ZigBee 网络原理与应用开发 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008: 1-102.
- [2] HOWITT I, GUITIERREZ J A. IEEE 802. 15. 4 low rate-wireless personal area network coexistence issues [C]//Proc of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. 2003: 1481-1486.
- [3] GARROPPO R G, GAZZARRINI L, GIORDANO S, et al. Experimental assessment of the coexistence of Wi-Fi, ZigBee, and Bluetooth devices [C]//Proc of IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks. 2011: 1-9.
- [4] 张招亮, 陈海明, 黄庭培, 等. 无线传感器网络中一种抗无线局域网干扰的信道分配机制 [J]. 计算机学报, 2012, 35(3): 504-517.
- [5] KIM T H, HA J Y, CHOI S. Improving spectral and temporal efficiency of collocated IEEE 802. 15. 4 LR-WPANs [J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2009, 8(12): 1596-1609.
- [6] POLLIN S, ERGEN M, TIMMERS M, et al. Distributed cognitive coexistence of 802. 15. 4 with 802. 11 [C]//Proc of the 1st International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications. 2006: 1-5.
- [7] CHULHO W, JONG-HOON Y, ALI H, et al. Adaptive radio channel allocation for supporting coexistence of 802. 15. 4 and 802. 11b [C]//Proc of the 62nd IEEE Vehicular Technology Conference. 2005: 2522-2526.
- [8] SIKORA A, GROZA V F. Coexistence of IEEE 802. 15. 4 with other systems in the 2. 4 GHz-ISM-band [C]//Proc of IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. 2005: 1786-1791.
- [9] SHIN S Y, PARK H S, CHOI S, et al. Packet error rate analysis of ZigBee under WLAN and Bluetooth interferences [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2007, 6(8): 2825-2830.
- [10] IEEE Std 802. 15. 4-2006, part 15. 4: wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (WPANs) [S]. New York: IEEE Press, 2006.