

# 一种适用于 WPAN 应用环境的高速自适应跳频系统及其性能分析

沈连丰, 邹 乐, 宋 扬, 宋铁成

(东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏南京 210096)

**摘 要:** 本文针对无线个域网(WPAN, *Wireless Personal Area Network*)工作环境复杂的干扰情况, 提出将自适应跳频技术应用其中的方案, 并以几个 WPAN 系统为例进行了定量计算. 得出了采用 AFH 技术后系统的误码特性, 最后以 802. 15. 1(Bluetooth) 及 802. 15. 3 系统为例, 对其主要的数据速率和 1600 跳/秒情况进行了数值计算. 结果表明, 在小区内存在多种系统工作在同一频段的情况下, 采用 AFH 技术的 WPAN 系统抗干扰性能差不多提高了 1~2 个数量级. 本文结论也可推广到使用高速跳频技术的其它 WPAN 系统.

**关键词:** 无线个域网; 自适应跳频 AFH; 抗干扰性能; 蓝牙系统; IEEE802. 11; HomeRF

**中图分类号:** TN914. 41 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 10-1540-04

## A High-speed AFH Scheme and Its Performance Analysis in WPAN Systems

SHEN Lian-feng, ZOU Le, SONG Yang, SONG Tie-cheng

(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

**Abstract:** This paper presents a scheme applying the technique of Adaptive Frequency Hopping (AFH) to WPAN system in which works on the complex interference environment and the performances of the bit error rate (BER) for some WPAN systems that use AFH technique are analyzed. First, the background of WPAN systems and the typical interferences in WPAN environment are discussed. Then, the theoretic analysis of especially the BER characteristics of this scheme is given. Finally, the simulation of the cases of data rates commonly used in 1600 hops/s is performed taking 802. 15. 1 (Bluetooth) and 802. 15. 3 system as examples. The results show that the AFH technique improves the BER performance of the WPAN systems nearly 1~2 order of magnitudes when these systems work in the same frequency band within a small area. The result is also applicable for other WPAN systems using high speed frequency hopping technique.

**Key words:** WPAN; AFH; anti-jamming performance (AFH); bluetooth system; IEEE802. 11; HomeRF

## 1 引言

移动通信与因特网的快速发展使人们实现“网络随身携带”的愿望成为可能, WPAN 正是顺应这种潮流提出的概念, 成为颇受瞩目的新热点, 而蓝牙(Bluetooth)系统及其应用使人们看到了 WPAN 的雏形.

WPAN 本质上是一种小范围的宽带无线多媒体接入系统, 采用非蜂窝的网络结构, 可以全球漫游. 为了提供宽带服务, WPAN 一般工作在 2GHz 以上的频段, 允许多种系统共享频率资源. 例如, Bluetooth 工作在 2.4GHz 的 ISM (Industrial, Scientific, Medicine) 频段, 在大部分国家无需缴纳频段占用费, 因此许多类似应用的无线通信系统(如 HomeRF、IEEE 802. 11 等)以及无绳电话、微波炉等家用电器都工作在该频段. 尽管大多数系统采取了抗干扰能力较强的跳频扩频(FHSS, Frequency Hopping Spread Spectrum)技术, 但目前提出的这些系统尚未充分发挥其抗干扰潜力, 在小范围应用时, 若工作区域内

的这类设备较少, 问题尚不突出, 否则将会使这类设备群体的性能大大下降, 因此研究复杂环境下 WPAN 应用时系统间的干扰特性及其抗干扰方法具有重要的意义. 这一问题已经引起人们的重视并提出了一些解决方案<sup>[1, 2]</sup>, 但这些方案有的仅仅是一些定性的概念, 缺少深入的分析和仿真, 有的仅仅针对 IEEE802. 11 系统. 为了更好地解决这个问题, 我们提出以系统优化为主要目标的解决方案, 在本文中, 重点讨论将自适应跳频技术引入 WPAN 应用时的关键技术, 并以 IEEE802. 15. 1(Bluetooth) 和 802. 15. 3 为例进行分析计算, 结果表明, 新方案比 Bluetooth 系统现有的跳频方案性能优越, 对原有系统不需做大的改动, 其结果也可以直接推广到其它使用跳频技术的 WPAN 系统中.

## 2 WPAN 应用环境的干扰分析

WPAN 应用频段的开放性决定着干扰种类的多样性并呈

收稿日期: 2001-06-13; 修回日期: 2002-01-24

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60072016); 教育部科学技术研究重点项目(No. 99176)

不断增加的趋势.就 2.4GHz 的 ISM 频段而言,根据我们的分析并参考文献<sup>[1-3]</sup>,目前至少存在着如下几种:

(1) 家用电器.例如微波炉,工作时将是一个大功率的部分频带干扰.

(2) 其它扩频无线通信系统. WPAN 环境下工作的系统几乎都采用扩频技术,如果它们采用直接序列扩频(DSSS, Direct Sequence Spread Spectrum),那么对其它 WPAN 系统来说就是小功率全频带干扰;如果采用跳频扩频,则极有可能发生碰撞,以 2.4GHz 频段为例,目前同时存在 Bluetooth、IEEE802.11、HomeRF 和其它扩频设备(如扩频无绳电话、医疗设备等),它们的跳频速率有快有慢,信息速率有高低,将等效为随机的单频或多频干扰.

(3) 系统的自干扰.当多个同一类型的 WPAN 设备在工作时,相互之间将构成干扰.

(4) 工作在同一频段的其它系统.例如:多路多点分配系统(MMDS, Multichannel Multipoint Distribution Systems);一些已经获得频率使用许可证的系统(如某些一点对多点微波通信系统)等.

可见,WPAN 系统工作环境存在很多干扰,且随时间、地点而异.通过实际测试发现,传输速率为 11Mbps、使用直扩方式的 IEEE802.11b 与 Bluetooth 共同工作时,后者的数据包丢失率达到了 13%左右<sup>[4,5]</sup>.如此高的包丢失率意味着频繁的重传,从而使 Bluetooth 本来就不高的信息传输速率变得更低.

现有的对干扰问题的解决方案主要是针对 IEEE802.11 和 Bluetooth 给出的<sup>[4]</sup>.这些解决方案包括:(1)在 2.4GHz 频段上对 Bluetooth 的使用范围做修正,使其只工作在 ISM 频段的一部分上;(2)对两种系统均做修正,都采用带有碰撞检测的载波侦听多路访问协议(CSMA/CD, Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection);(3)只是采用 Bluetooth 中延长跳频时隙的选项以减少干扰.但从以上对干扰环境的分析表明,WPAN 系统所面临的干扰源是复杂的,例如 Bluetooth 不但应当躲避 IEEE802.11 的干扰,而且还应当躲避其它的干扰,同时不对其它已有的使用者造成干扰.要做到这一点,以上的方案是不够的.

### 3 AFH 应用于 WPAN 系统及其性能分析

自适应跳频(AFH, Adaptive Frequency Hopping)技术能够使跳频系统自适应地躲避干扰载频,从而在复杂的干扰环境下正常工作.针对前述的干扰,我们参考文献[6~11],提出将 AFH 技术应用于 WPAN 系统的方案.

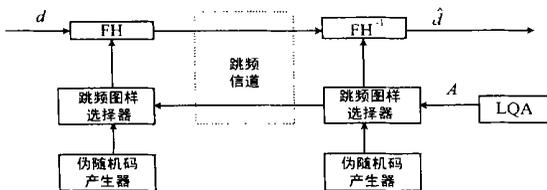


图 1 AFH 系统的原理框图

图 1 是 AFH 系统的原理框图.它比一般的跳频系统仅仅

多出了一个连接质量分析器(LQA, Linking Quality Analyzer).系统存在工作信道和反馈信道.在发送端,伪随机序列发生器产生的伪随机序列控制跳频图样选择器选择跳频图样,通过工作信道发送;在接收端,在按照发送的跳频序列接收数据的同时,还要使用 LQA 对工作信道各个跳频信道的通信质量进行监测,如果 LQA 发现某个或某些载频受到干扰而达到需要置换的程度,它将产生一个新的跳频图样并通过反馈信道通知发送端的跳频图样选择器.为了分析方便,假定在发射端发送一帧  $L$  跳,而接收端在接收完这一帧后做一次跳频图样的修正,通过反馈信道向发送端送出包含  $L_f$  跳的数据,如图 2 所示.

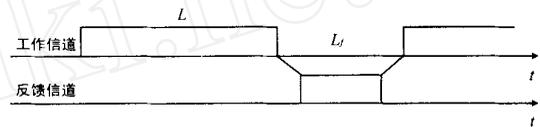


图 2 AFH 系统时间分配

在以下分析中,我们参考文[6]的简单双状态干扰模型.在该模型中,每一个信道都可以看作处于两个状态之一,即拥塞状态(Bad)或通畅状态(Good).用  $P(B)$  代表某一信道处于拥塞状态的概率,  $P(G)$  代表处于通畅状态的概率.令  $r = P(B|G)$ 、 $s = P(G|B)$  分别为两种状态的转移概率,则这两种状态之间的转换可以用马尔可夫链来描述.另外,再假设每一信道状态之间的转换是独立的.

设跳频系统可在  $N$  个可供选择的信道中自适应地选择  $N_a$  个“好”信道作为跳频信道,然后在这些信道上采用通常的跳频方法.在  $N_a$  个使用的信道中设置一个干扰门限来区分上述两种状态,当某一信道中的干扰超过这一门限时,就认为该信道是“坏”的,用状态  $B$  表示.反之,则认为该信道是“好”的,用状态  $G$  表示.  $Q$  表示任一信道干扰超过该门限的概率,则

$$Q = P(B) = r / (r + s) \tag{1}$$

其大小由接收端所定的干扰门限值、信号功率和干扰源功率等因素共同决定.

设某一信道处于“坏”状态的平均时间为  $t_0$ (以跳频间隔为单位时间),则

$$s = P(G|B) = \frac{1}{t_0}, r = P(B|G) = \frac{1 - Q}{1 - Q} \tag{2}$$

用  $M_i$  表示第  $i$  跳中在所选择的  $N_a$  个使用频段中出现“坏”情况的频段数,则有

$$E[M_i | M_0 = m] = m(1 - (r + s))^i + N_a r \frac{1 - (1 - (r + s))^i}{r + s} \tag{3}$$

其中  $m$  为在初始状态  $M_0$  下  $N_a$  个使用频段中处于“坏”状态的个数.令  $p_i(m)$  为第  $i$  跳时的误码率,  $P_B$  为信道处在“坏”状态时的误码率,  $P_G$  为信道处在“好”状态时的误码率,假设  $P_G \ll P_B$ ,  $E[M_i | M_0 = m] \ll N_a$ , 则

$$p_i(m) = \frac{N_a - E[M_i | M_0 = m]}{N_a} P_G + \frac{E[M_i | M_0 = m]}{N_a} P_B \tag{4}$$

把  $m$  和  $p_i(m)$  分别用  $E[M_0]$  和  $p_i$  代替,得

$$p_i = P_G + P_B Q - P_B \left( Q - \frac{E[M_0]}{N_a} \right) \left( 1 - \frac{1}{(1-Q)^0} \right)^i \quad (5)$$

则在一帧中平均比特误码率为

$$p = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L p_i = P_G + P_B \left[ \frac{E[M_0]}{N_a} + \frac{L}{2} \left( r - \frac{E[M_0](r+s)}{N_a} \right) \right] \quad (6)$$

更进一步,假设完成一帧数据传送后,LQA 选择的  $N_a$  个新的信道中“坏”信道的平均个数为  $E[B]$ ,则经过了长为  $L_f$  的反向信道传输时间后,得到开始传输数据时的平均“坏”信道个数为

$$E[B] = Q N_a - (Q N_a - E[B]) \left( 1 - \frac{1}{(1-Q)^0} \right)^{L_f} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6),得最终的比特误码率为

$$p = P_G + P_B \left\{ \frac{1}{N_a} [Q N_a - (Q N_a - E[B]) \left( 1 - \frac{1}{(1-Q)^0} \right)^{L_f}] + \frac{L}{2} \left[ r - \frac{(r+s)}{N_a} (Q N_a - (Q N_a - E[B]) \left( 1 - \frac{1}{(1-Q)^0} \right)^{L_f}) \right] \right\} \quad (8)$$

$$E[B] = \sum_{i=0}^{N_a} (N_a - i) \binom{N}{i} (1-Q)^i Q^{N-i} \quad (9)$$

把式(9)代入式(8)可得到最终的结果.显然,这个最终结果与  $Q$  有着密切的关系,而  $Q$  由 LQA 挑选“好”信道的能力决定.所以,最终的误码率与 LQA 有很大关系.LQA 挑选出的信道组的平均“坏”信道个数越少,最终比特误码率就越小.

#### 4 应用于 WPAN 的情况及其分析

文献[9]给出了短波频段中 AFH 系统与普通 FH 系统比较的结果,表明 AFH 系统有着更好的性能.这里将图 1 的模型应用到 WPAN 系统,设  $N = 84$ ,而 LQA 的计算时间很短以及 WPAN 仅工作在小范围,故可将计算时延和反向传输时延忽略不计.这样,给出 LQA 的门限值以及有关参数,即可由前述分析计算出对应的误码特性. IEEE802.15 工作组定义了三个不同的 WPAN 类型,按传输速率从高往低排列分别为<sup>[12]</sup>:适用于高速应用的 802.15.3,传输速率在 10Mb/s 以上;基于 Bluetooth 的 802.15.1,目前传输速率为 1Mb/s;为低速率环境应用开发的 802.15.4,传输速率小于 0.25Mb/s.这里将 802.15.1 和 802.15.3 作为典型的 WPAN 例子进行计算.

由于 Bluetooth 采取错误重传的方式,可以在 LQA 中选定错误重传次数的门限值  $m$ .当错误重传的次数超出  $m$ ,就认为该信道是“坏”信道.设定在码元传输速率为 1Mb/s 的情况下,以非相干 2FSK 进行解调,“好”信道和“坏”信道的平均误码率  $P_G$ 、 $P_B$  分别为 0.0001 及 0.2.取每次重新选取信道集的时间间隔为 6.75 秒,  $t_0 = 2$  分钟.以此为基准,可以得到码元速率分别为 10Mb/s 和 20Mb/s 的 802.15.3 系统的  $P_G$ 、 $P_B$  值,如表 1 所示.对应于 802.15.1 即 Bluetooth,若选择发送 DMI 包,以跳频间隔为一个单位,则  $L$  和  $t_0$  的值分别为 5400 和 96000,当发送其他类型 Bluetooth 基带包(如 DH3、DH5 等)时,误码率基本没有改变,故仅以 DMI 包为例.以跳频间隔为一个单位,则在三种速率下  $L_f$ (在码元速率提高的情况下,近似看作基带数据包负载相应增大)的数据如表 2 所示.这样,根据式(8)、(9)和上述不同

表 1 仿真中所需数据表

WPAN 码元速率 (Mb/s)	1Mb/s	10Mb/s	20Mb/s
$P_G$	$1 \times 10^{-4}$	0.06	0.17
$P_B$	0.20	0.40	0.45
发射功率 (mW)	1	2.5	2.5

的数据传输速率绘制了 WPAN 系统的误码率  $p$  与  $Q$  的关系,如图 3~5 所示.从图中可以看到,在同样的干扰环境下,采用 AFH 技术的 WPAN 系

统的性能比不采用该技术时提高了许多.以图 3 为例,在  $Q = 0.08$  时,使用  $N_a = 23$  的 AFH 技术与不使用 AFH 技术 WPAN 系统的误码率  $p$  分别为  $5.895 \times 10^{-4}$ 、 $1.61 \times 10^{-2}$ ,图 4 和图 5 也有类似的结果;若误码

表 2 仿真中所需数据

WPAN 码元速率	$N_a$	
	84	79
1Mb/s	4	2
10Mb/s	1	1
20Mb/s	1	1

率 1% 看作是 802.15.1 (Bluetooth) 信道可容忍的门限,则从分析和计算结果可以看出,采用  $N_a$  为 23 或 79 的 AFH 技术的与不采用该技术相比较,所对应的  $Q$  分别为 0.63、0.1 和 0.05,这表明采用 AFH 技术的 Bluetooth 系统的抗干扰性能差不多提高了 1 个数量级.由此可见,AFH 技术使 WPAN 系统的抗干扰能力大大增强,在大多数情况下,其误码性能差不多有 1~2 个数量级的改善.另外,从图上也可清楚地看到  $N_a$  数目不同时  $p$  的差别,显然,在同样的干扰情况下, $N_a$  越小,LQA 选出来的信道情况就越好,误码率也越小.

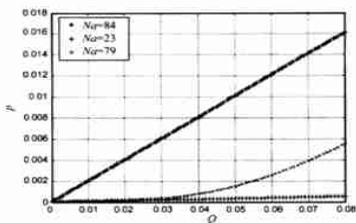


图 3 发送基带包为 DMI 时 IEEE 802.15.1 WPAN 系统的误码特性(码元速率为 1Mb/s)

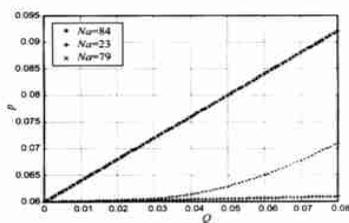


图 4 发送基带包为 DMI 时 IEEE 802.15.3 WPAN 系统的误码特性(码元速率为 10Mb/s)

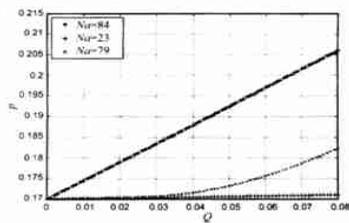


图 5 发送基带包为 DMI 时 IEEE 802.15.3 WPAN 系统的误码特性(码元速率为 20Mb/s)

## 5 结论

以上对 AFH 应用于 WPAN 系统进行了理论分析,并以 IEEE802.15.1 (Bluetooth) 和 IEEE802.15.3 系统为例进行了数值计算,结果表明,AFH 技术使 WPAN 系统的抗干扰能力差不多有 1~2 个数量级的改善.由于选出来的信道组中“坏”信道平均个数已经很小,这也大大降低对其它系统的干扰.如果将比较判别的时间缩短,将基本上逼近于跳频信道的实时优化.

由于 Bluetooth 具有 79 频点和 23 频点兼容的特点,因此,若对其增加一个 LQA 并可实时修改其频率合成器的频率表,则可应用本文方案而其它改动很小.本文方案也可推广到其它使用跳频技术的 WPAN 系统之中.

## 参考文献:

- [ 1 ] Duane Buddrius, BreezeACCESS, BreezeNET. A robust wireless access solution for unlicensed band ISP services [ R ]. Product Management BreezeCOM Inc. 2001.
- [ 2 ] John Burns, Richard Rudd, Aoran Spasojevic. Compatibility between radio communication & ISM systems in the 2.4 GHz frequency band [ R ]. Aegis Systems Limited, 1999.
- [ 3 ] Spectrum Management Advisory Group, Demand for use of the 2.4 GHz ISM band final report [ R ]. Aegis Systems Limited, 2000.
- [ 4 ] A Kamerman. Coexistence between Bluetooth and IEEE 802.11 CCK solutions to avoid mutual interference [ R ]. Lucent Technologies Bell Laboratories Jan. 1999.
- [ 5 ] Gblmie, N., Mouveaux, F. Impact of interference on the Bluetooth access control performance: Preliminary results [ R ]. in IEEE P802.11 Working Group Contribution, IEEE P802.15 - 00/322R0, Gaithersburg, Maryland, September 2000.
- [ 6 ] Zander, J. and Malmgren, G. Adaptive frequency hopping in HF communications [ J ]. IEE Proc. Commun., 1995, 142(2): 99 - 105
- [ 7 ] Zurbes S., Stahl W., Matheus K., Haartsen J. Radio network performance of bluetooth [ A ]. in Proceedings of IEEE International Conference on Communications, ICC 2000 [ C ]. New Orleans, France, LA: ICC, 2000.
- [ 8 ] ZANDER J. Adaptive frequency hopping in HF communications [ A ]. Proc. IEEE MILCOM-93 [ C ]. Bedford, MA: IEEE, 1993. 600 - 604.
- [ 9 ] BARK, G. Performance comparison of spread-spectrum methods on an interference-limited HF channel [ J ]. IEE Proc. Commun., 1999, 146(1): 23 - 28
- [ 10 ] BARK, G. Spread-spectrum communications in the interference limited HF band [ D ]. Sweden: Royal Institute of Technology, 1997.
- [ 11 ] Version 1.1. Specification of the Bluetooth System (Core) [ S ].

## 作者简介:



沈连丰 男, 1952 年 7 月生于江苏省扬州市, 1982 年毕业于南京工学院, 获硕士学位, 现为东南大学移动通信国家重点实验室教授、博士生导师, 主要从事移动通信、无线多媒体通信和无线互联网等方向的研究工作。



邹乐 男, 1976 年 5 月生于广东省广州市, 1999 年 7 月于东南大学无线电系毕业后继续在该系移动通信国家重点实验室攻读硕士学位, 研究兴趣为高速无线互联网技术和移动通信等。