

蓝牙数据广播性能分析与自适应分组选择策略^{*})

徐 飞 庄奕琪 郭 锋

(西安电子科技大学微电子学院 宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室 西安 710071)

摘 要 分析了蓝牙 GFSK 调制方式在加性高斯白噪声信道(AWGN)下的比特错误率(BER)与平均接收信噪比的关系,推导了 ACL 数据分组的重传概率与平均接收信噪比的函数表达式,并且计算出了各个数据分组在不同信噪比的情况下广播重传次数和传输吞吐量。为了提高蓝牙在噪声环境下的广播性能,提出了一种自适应数据分组选择策略,通过在不同的信噪比情况下选择合适的分组类型进行广播而获得最大的广播吞吐量,给出了分组类型切换的信噪比门限值。仿真计算结果表明了该策略的有效性。

关键词 蓝牙,广播,信噪比,数据传输吞吐量

Analysis of Bluetooth Broadcasting Performance and Adaptive Packet Selection Strategy

XU Fei ZHUANG Yi-Qi GUO Feng

(School of Microelectronics, Key Lab. of Ministry of Education for Wide band-gap Semiconductor Materials and Devices, Xidian University, Xi'an 710071)

Abstract Relations between bit error rate and average received signal-to-noise ratio(SNR) in AWGN channel are derived for GFSK modulation mode adopted by Bluetooth specification. The function expressions of packet retransmission probability and average receive SNR of ACL data packets are put forward, and the broadcasting times of retransmission and the throughput of all data packets in different SNRs are investigated. The Adaptive packet selection strategy is presented. The maximum broadcasting throughput is obtained by selecting the appropriate packet types to transmit in different SNRs. The SNR threshold values for packet type switching are also presented. Finally, the strategy is also verified by the simulation.

Keywords Bluetooth, Broadcasting, Signal-to-noise ratio, Data transmission throughput

1 引言

蓝牙标准协议规定,几个蓝牙设备可以连接组成一个微微网(Piconet),其中一个为主设备其余的均为从设备,微微网是蓝牙最基本的一种网络形式。蓝牙微微网提供一种广播机制,主设备可以同时给每一个从设备发送广播信息。由于广播数据分组没有确认机制,所以需要广播分组进行适当的重传,以提高广播的可靠性。然而,分组重传会大大降低数据传输的吞吐量。另外,蓝牙工作在 2.4GHz 的工业、科学和医学(Industrial, Scientific and Medical, ISM)频段^[1],由于其开放性,工作在这个频段的无线电设备有很多种,这样来自其他无线设备的干扰会更明显。为此需要改善蓝牙数据传输的抗干扰能力以降低重传次数、得到比较高的广播数据传输的吞吐量。

Andre Stranne 等研究了蓝牙数据包长度对蓝牙数据传输吞吐量的影响^[2]; Valenti 等研究了在加性高斯白噪声(AWGN)与瑞利(Rayleigh)衰落信道下分组重传概率与蓝牙链路吞吐量之间的关系^[3]; N. Golmie 等对蓝牙设备与 802.11 设备共存时的互干扰情况进行了详细的分析并提出了解决方法^[4]; G. Pasolini 等研究了平均接收信噪比与分组错误率间的关系^[5]。这些研究都是对蓝牙的数据传输性能在不同方面进行了分析,并且也给出了一些改进的思路,但是,目前并没有相关文献对提高蓝牙的广播性能进行有效的分析和研

究。本文以加性高斯白噪声信道(AWGN)为信道模型,分析了蓝牙在不同信噪比下的广播特性,并且提出了达到最好的广播特性的自适应分组选择策略。

2 蓝牙基带数据分组类型及其抗干扰方式

蓝牙系统采用了分组(包)的传输方式:将信息分组打包,时间划分为时隙,每个时隙发送一个分组包。在蓝牙基带协议中定义了分组的编码序列必须遵循图 1 的通用格式。每一分组由三部分组成:接入码、分组头和有效载荷,图中给出了每个部分所占的位数。

如果接入码之后有分组头信息,则长度为 72 位。它主要用于同步、DC 补偿平衡和识别,对于至关重要的接入地址单元采用(64,30)BCH 编码和 64 位 PN 码异或而成。该编码的最小汉明码离为 14,纠错能力极强。

LSB 68/72	54	0-2745 MSB
ACCESS CODE	HEADER	PAYLOAD

图 1 基带传输标准分组格式

分组头包含链路控制消息,总信息长度为 18 位,经过 1/3 速率的 FEC 编码形成 54 位的头序列。这是一种较简单的纠错码方式,对每位信息采用了三位重复码。在分组头中定义了分组的类型,其中能够进行信息传输的是 ACL 分组和 SCO 分组。SCO 分组采用电路交换方式,进行同步传输,该

^{*})基金项目:国防总装备部项目资助。徐 飞 博士研究生,主要研究方向为短距离无线通信系统与芯片的信号完整性;庄奕琪 教授,博士生导师,研究领域包括短距离无线通信芯片设计以及系统解决方案,半导体噪声和可靠性等。

分组不包括循环冗余检测(CRC)码,而且不允许重传,目前主要用于 64kb/s 的语音传输。真正适用于数据传输的是 ACL 分组,该分组采用分组交换方式,进行异步传输。目前已定义了七种 ACL 分组,如表 1 所示。

表 1 蓝牙规范 ACL 分组特性

类型	用户载荷 (bytes)	FEC	CRC	非对称最大速率 (kb/s)	
				前向	反向
DM1	0-17	2/3	有	108.8	108.8
DH1	0-27	无	有	172.8	172.8
DM3	0-121	2/3	有	387.2	54.4
DH3	0-183	无	有	585.6	86.4
DM5	0-224	2/3	有	477.8	36.3
DH5	0-339	无	有	723.2	57.6

净荷部分因分组类型不同其编码的方式也不同。对于 DH 分组只进行 16 位的 CRC 校验,生成多项式为 $g(D)=D^{16}+D^{12}+D^5+1$,生成的 CRC 码可以捕捉一位错、二位错、具有奇数个错的全部错误,可以捕捉突发错误长度小于 16 的全部错误、长度为 17 的突发错误的 99.998%、长度为 18 以上的突发错的 99.997%。对于 DM 分组不仅有 CRC,还有 2/3 码率的 FEC 编码,2/3 FEC 方案采用了一种(15,10)简明汉明码表示方式,其生成多项式为 $g(D)=(D+1)(D^4+D+1)$ 。将 10 位信息代码之后补足五位零之后,除以该多项式得到的五位余数即为其监督码,放于 10 位信息代码之后,成为 15 位代码字。该代码字能够在各代码字中纠正一位错误和检测两位错误,其有效信息率为 2/3^[1]。

3 蓝牙数据分组重传概率分析

分析假设在一个数据分组发送过程中信道的信噪比是恒定值,并且 CRC 校验总是能够检测出数据载荷传送过程中出现的错误。

如果知道瞬时信噪比,就可以求出数据分组重传概率。当出现以下三种情况之一便会引起分组丢失^[6]:

- (1) 事件 A:发送分组的接入码同步错误。
- (2) 事件 B:发送分组的分组头经 1/3 比例 FEC 校验错误。
- (3) 事件 C:发送分组的载荷经过 CRC 校验错误。

数据分组的重传概率分析表达式为:

$$P_r(\gamma)=1-P[\bar{A}]P[\bar{B}]P[\bar{C}] \quad (1)$$

(1)式中, $\bar{A}$ 代表事件 A 的补, $P[\bar{A}]$ 代表事件 A 不发生的概率。 γ 表示发送分组所处信道的瞬时信噪比。

蓝牙接收单元的相关器将解调器的输出与已存储的接入码进行相关计算,当相关器的输出超过一个门限值时分组即被同步,接入码的 72 位中的 T 位被正确解调时即同步,即当接入码有不超过 72-T 个错误时分组才能被成功同步,因此:

$$P[\bar{A}]=\sum_{k=0}^{72-T} \binom{72}{k} (P_b(\gamma_f))^k (1-P_b(\gamma_f))^{72-k} \quad (2)$$

式(2)中: $P_b(\gamma_f)$ 为发送分组的位错误率,式(6)中的 T 值取 65。

前向分组头经 1/3 比例 FEC 检测错误导致事件 B 发生,

(3,1)编码可以纠正一个错误,因此:

$$P[\bar{B}]=(3P_b(\gamma_f))(1-P_b(\gamma_f))^2+(1-P_b(\gamma_f))^3)^{18} \quad (3)$$

事件 C 最容易发生。由于假设 CRC 解码可以检测出所有错误,对于 DH 类型分组,只要载荷的任何一位发生错误即

可导致事件 C 发生。

$$P[\bar{C}]=(1-P_b(\gamma_f))^m \quad (4)$$

式中:对于 DH1, $m=240$; DH3, $m=1496$; DH5, $m=2744$ 。

DM 类型分组的载荷受(15,10)汉明码保护,每 15 位码元纠正一位错误,因此:

$$P[\bar{C}]=(15P_b(\gamma_f)(1-P_b(\gamma_f))^{14}+(1-P_b(\gamma_f))^{15})^{\lceil \frac{8 \cdot m+16}{10} \rceil} \quad (5)$$

式中:对于 DM1, $m=17$; DM3, $m=121$; DM5, $m=224$ 。

4 蓝牙广播性能分析和自适应选择策略

设在特定的信噪比条件下,蓝牙广播可靠性要达到 99% 的成功率需要进行 n 次重传,则有:

$$1-P_r(\gamma_1) \cdot P_r(\gamma_2) \cdots P_r(\gamma_n) \geq 99\%$$

其中: γ_i 为第 i 个发送分组的瞬时 SNR,因假设分组与分组间是非相关的,即准静态衰落,分组间 SNR 的概率密度函数相同^[7],则:

$$1-\bar{P}_r(\bar{\gamma})^n \geq 99\% \quad (6)$$

式中: $\bar{\gamma}=E\{\gamma\}$,即平均 SNR, $\bar{P}_r(\bar{\gamma})$ 为相应的平均重传概率,进一步可以求出:

$$n \geq \log_{\bar{P}_r(\bar{\gamma})}^{(1-99\%)} \quad (7)$$

式(6)(7)中,n 为大于 0 的整数。

对于任何类型的广播分组,吞吐量 R 为重传次数 n 的函数:

$$R = \frac{\text{净荷长度}}{\text{分组传输时间}} = \frac{K}{D \cdot n \times 625 \times 10^{-6}} \quad (8)$$

其中:D 为包括返回分组的每次传输所占用的时隙数(对于 Dx1 分组为 2,Dx3 分组为 4,Dx5 分组为 6),K 为分组中数据位的大小(DM1:136;DM3:968;DM5:1792;DH1:216;DH3:1464;DH5:2712)。

蓝牙数据传输吞吐量是信噪比的函数,要计算广播分组成功概率达到 99% 的重传次数 n 和此时吞吐量 R 的值,必须要求出平均信噪比 $\bar{P}_r(\bar{\gamma})$ 的值。在 AWGN 信道中,瞬时信噪比等于平均信噪比的 $\bar{\gamma}=\gamma$,而且有 $\bar{P}_r(\bar{\gamma})=P_r(\gamma)$ 。

至此,要求 n 和 R 的值,只需要求出发送分组的位错误率 $P_b(\gamma_f)$ 。GFSK 调制方式下,当 FSK 的调制指数小于 0.5 时,信号的相关性可用下面的 ρ 来表示^[6]

$$\rho = \frac{\sin(2\pi h)}{2\pi h}$$

定义 2 个常数 a 与 b:

$$a = \sqrt{\frac{\gamma}{2}(1-\sqrt{1-\rho^2})} \quad b = \sqrt{\frac{\gamma}{2}(1+\sqrt{1-\rho^2})} \quad (9)$$

其中 $\rho = \frac{\sin(2\pi h)}{2\pi h}$, $h=0.32$ 为调制指数,则位错误率可以表示为^[6]:

$$P_b(\gamma) = Q_1(a, b) - \frac{1}{2} e^{-(a^2+b^2)/2} I_0(ab) \\ = e^{-\gamma/2} \left\{ \frac{1}{2} I_0(ab) + \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{a}{b} \right)^k I_k(ab) \right\} \quad (10)$$

其中: $Q(a, b)$ 是马库姆(Marcum)Q 函数, $I_0(x)$ 是零阶修正贝塞尔函数。

图 2 表示在不同的信噪比下,蓝牙各个数据分组要达到 99% 的广播成功率的广播数据传输吞吐量。

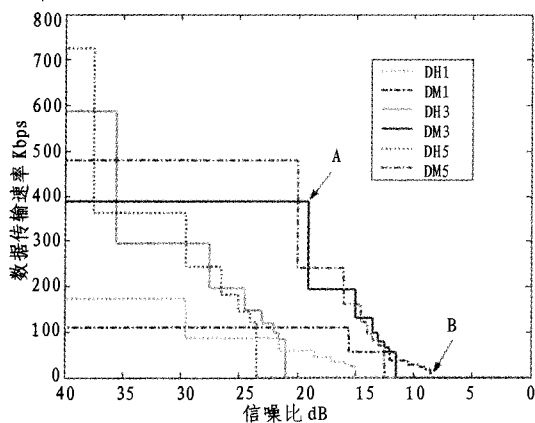


图2 达到99%的广播成功率,蓝牙各个数据分组的最大传输吞吐量

表2 各种信噪比下,达到99%的广播成功率并且要实现最大传输吞吐量应选用的数据分组形式和重传次数

信噪比(dB)	分组类型	重传次数	传输速率(Kbps)
37.5<SNR	DH5	1	723.2
[35.5,37.5]	DH3	1	585.6
[20,35.5]	DM5	1	477.8
[19,20]	DM3	1	387.2
[16,19]	DM5	2	238.9
[15,16]	DM3	2	193.6
[14.5,15]	DM5	3	159.3
[13.5,14.5]	DM3	3	129.1
[13,13.5]	DM3	4	96.8
[12.5,13]	DM3	5	77.4
[12,12.5]	DM3	6	64.5
[11.5,12]	DM3	7	55.3
[10.5,11.5]	DM1	3	36.2
[9.5,10.5]	DM1	4	27.2
[9,9.5]	DM1	5	21.8
[8.5,9]	DM1	6	18.1

表2表示在不同的信噪比下,要达到99%的广播成功率,蓝牙数据分组选择策略,给出了分组类型切换的信噪比门限值,并且给出了要达到最佳性能的分组合重传次数和最大吞吐量。

图3显示了要达到99%的广播成功率,采用自适应分组选择策略时,蓝牙最好的广播性能。可见,在不同的信噪比条件下,选择合适的数据分组格式,能够取得一个最好的广播性能。

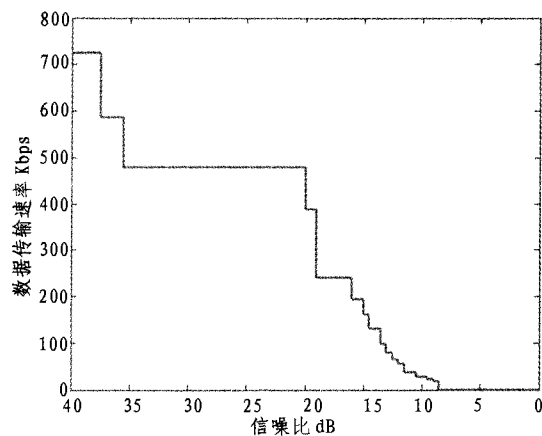


图3 采用自适应分组选择策略的广播数据传输性能

结论 本文对蓝牙规范的ACL数据分组特性及其抗干扰方式进行了研究,以加性高斯白噪声信道(AWGN)为信道模型,分析了蓝牙数据分组重传概率与位错误率的关系,推导出了各个数据分组类型在不同的信噪比下要达到最好的广播性能需要的重传次数,并且给出了实现最大的传输吞吐量的分组选择策略。利用这种自适应分组选择策略能够明显改善不同信噪比信道下的蓝牙广播数据传输性能。

参考文献

- 1 SIG. Specification of the Bluetooth System. Core, Version 1.2. <http://www.bluetooth.com>, 2004
- 2 Stranne A, Edfors O, Molin B A. Throughput Dependence on Packet Length in Bluetooth Network. RVK 05, Linköping, Sweden, June 2005
- 3 Matthew C. Valenti Lane dept. of Comp. Sci. & Elect. Eng. West Virginia University Morgantown. On the throughput of Bluetooth data transmissions. In: IEEE Wireless Communications and Networking Conference [C], 2002. 119~123
- 4 Golmie N, Van Dyck R E, Soltanian A. Interference of Bluetooth and IEEE 802.11: Simulation Modeling and Performance Evaluation. In: Proceedings of the Fourth ACM International Workshop on Modeling, Analysis, and Simulation of Wireless and Mobile Systems, MSWIM'01, Rome, Italy, July 2001
- 5 Pasolini G, Verdone R. Analytical Evaluation of Throughput for a Bluetooth Piconet with MAC Level Link Adaptation. Special Issue on WLAN Optimization at the MAC and Network Levels. Journal On Special Topics In Mobile Networking And Applications (KLUWER)
- 6 Kleinschmidt J H, Pellenz M E, Jamhour E. Bluetooth network performance in Nakagami-m fading channels. In: IFIP TC6 International Conference on Mobile and Wireless Communications Networks, Singapore, October 2003
- 7 Proakis J. Digital Communications. New York, NY: McGraw Hill, Inc., fourth ed, 2001

(上接第47页)

下一步研究方向:(1)WTLS证书的具体实现(如密钥的产生,证书签发,密钥使用,证书撤销链表的管理等等)还需要进一步完善。(2)用程序来实现认证的一部分功能。(3)在WTLS握手协议第四条消息中,新增的一个K_BU绑定密钥可使用组合密钥来产生,通信双方都拥有一个密钥池,传送密钥时只需发送索引不用再发送密钥,从而又可以减少MN和CN之间数据的传输。

参考文献

- 1 孙利民,阚志刚,郑健平,等.移动IP技术[M].北京:电子工业出

版社,2003

- 2 Andersson M, Bergström K. WAP - a study of the concept for mobile service provisioning
- 3 Wireless Application Protocol Architecture Specification. <http://www.wapforum.org>
- 4 何世华,杨磊,秦永华.对WAP中端到端技术的安全研究.九江学院学报,2005,1:11~14
- 5 Hämetvaara V. Certificate Management in Mobile Devices; [M. Sc. Thesis]. Tampere University of Department of Computer and Information Sciences, 2002
- 6 王治国,肖德贵.基于无线PKI的微型证书的分析与实现.科学技术与工程,2006,6(3):278~282