

提高蓝牙广播性能的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, 西安 710071)

摘要: 分析了蓝牙 2.0+EDR 新规范 $\pi/4$ -DQPSK 与 8DPSK 调制方式在加性高斯白噪声信道(AWGN)下的比特错误率与平均接收信噪比的关系, 推导了 ACL 数据分组的广播重传概率与平均接收信噪比的函数表达式, 提出了蓝牙 2.0+EDR 广播数据分组在加性高斯白噪声信道下的自适应分组选择策略, 即通过在不同的信噪比下选择不同的分组类型进行传输以得到最少的广播重传次数和最大的传输吞吐量。仿真结果为在不同信道条件下取得最好的广播效果提供了参考。

关键词: 蓝牙广播; 加性高斯白噪声信道; 信噪比; 数据传输吞吐量

Adaptive Packet Selection Strategy for Broadcast Performance of Bluetooth Improvement

XU Fei, ZHUANG Yi-qi, GUO Feng

(School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071)

【Abstract】 Relations between bit error rate (BER) and average received signal-to-noise ratio(SNR) in AWGN channel are derived for $\pi/4$ -DQPSK and 8DPSK modulations modes in Bluetooth 2.0+EDR specification. Function expressions of packet broadcasting retransmission probability and average received SNR of ACL data packets are put forward. The adaptive packet selection policy is presented for the Bluetooth 2.0+EDR specification packets in different SNRs, which selects proper packet in different SNRs to get the least retransmission times and the maximal broadcasting throughput. Simulation results can be used to achieve a good broadcast performance in different channel conditions.

【Key words】 Bluetooth broadcast; AWGN channel; signal-to-noise ratio; data transmission throughput

1 概述

蓝牙特别兴趣小组(SIG)最新发布的蓝牙核心规范 Version 2.0+EDR(增强数据速率)^[1,2]提高了数据传输速率(最高支持 3Mb/s的数据传输率, 比当前 1Mb/s的标准提高了 3 倍), 降低了功耗。新规范增加了 6 种新的ACL分组格式: 2-DH1, 2-DH3, 2-DH5, 3-DH1, 3-DH3, 3-DH5, 其中 2-DH 与 3-DH 类型分组与 DH 类型分组格式基本相同, 但载荷部分分别使用 $\pi/4$ -DQPSK(相对四相相移键控)与 8DPSK(八相差分相移键控)调制方式^[2]。

蓝牙协议规定, 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, 其余均为从设备。微微网是蓝牙最基本的一种网络形式, 它提供一种广播机制, 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, 因此需要对广播分组进行适当的重传, 以提高广播的可靠性。在一定的信噪比条件下, 要达到一定的广播成功率, 选用不同的数据分组类型得到的广播性能差异非常大。文献[3]研究了蓝牙数据包长度对蓝牙数据传输吞吐量的影响, 文献[4]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。这些研究都对蓝牙的数据传输性能在不同方面进行了分析, 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 2.0+EDR 规范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为信道模型, 分析了蓝牙 2.0+EDR 规范各种调制方式的位错误率与信噪比的关系, 以及广播分组重传概率与平均接收信噪比之间的关系, 进而得

到了在不同信噪比下要达到最好的广播性能应该选择的数据分组类型及对应重传次数。

2 蓝牙 2.0+EDR 数据分组特性分析

蓝牙系统中有 2 种物理链路: 异步无连接链路(asynchronous connectionless, ACL)和同步面向连接链路(synchronous connection oriented, SCO)。ACL 链路主要用于对时间要求不敏感的数据传输, 如文件传输; SCO 链路主要用于对时间要求很高的数据通信, 如语音。一般的数据传输都是应用 ACL 链路, ACL 分组都采用循环冗余校验(CRC)和自动重传请求(ARQ)机制来提高数据传输的可靠性。ACL 分组的表示形式为 D(M|H)(1|3|5), 分组特性见表 1。其中, D 代表数据分组; M 代表 2/3 比例 FEC 的中等速率分组; H 代表不使用纠错编码的高速率分组; 1, 3, 5 分布表示该分组占用的时隙数。

以 DM3 和 DH3 分组为例来分析蓝牙 2.0+EDR 规范数据分组特性: DM3 表示占用 3 个发送时隙, 载荷部分包含 2B 的有效载荷头, 最多 121B 的用户数据和 16b 的 CRC 校验, 经过 2/3 比例 FEC 以后变为 1 500b; DH3 表示占用 3 个发送时隙, 载荷部分包含 2B 的有效载荷头, 最多 183B 的用户数据和 16b 的 CRC 校验, 不进行 FEC 编码, 数据载荷部分共有 1 496b。蓝牙 2.0+EDR 规范数据分组特性见表 1。

作者简介: 徐 飞(1980 -), 男, 博士研究生, 主研方向: 短距离无线通信系统, 芯片的信号完整性; 庄奕琪, 教授、博士生导师; 郭 锋, 讲师、博士研究生

收稿日期: 2007-01-23 **E-mail:** xuzaiwei@gmail.com

表1 蓝牙 2.0+EDR 规范 ACL 分组特性

类型	用户载荷/B	FEC	CRC	非对称最大速率/(Kb·s ⁻¹)	
				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
2-DH1	0-54	无	有	345.6	345.6
2-DH3	0-367	无	有	1 174.4	172.8
2-DH5	0-679	无	有	1 448.5	115.2
3-DH1	0-83	无	有	531.2	531.2
3-DH3	0-552	无	有	1 766.4	235.6
3-DH5	0-1021	无	有	2 178.1	177.1

3 蓝牙广播数据分组重传概率

假设在一个广播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，就可求出数据分组重传概率。出现以下3种情况之一便会引起广播数据的分组丢失^[4]：

- (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

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

其中， \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，

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

其中， $P_b(\gamma_f)$ 为发送分组的位错误率； 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，

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

事件 C 最容易发生。由于假设 CRC 校验可以检测出所有错误，因此对于 DH 类分组类型，只要载荷的任何一位发生错误都会导致事件 C 的发生，在 GFSK 调制方式下：

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

其中，对于 DH1， $m=240$ ；对于 DH3， $m=1496$ ；对于 DH5， $m=2744$ ；对于 2.0+EDR 规范新增的 2-DH 与 3-DH 类型分组，其 $P[\bar{C}]$ 部分的位错误率应分别用 $P_b^*(\gamma)$ 与 $P_b^+(\gamma)$ 计算，即为

$$P[\bar{C}] = (1 - P_b^*(\gamma))^m \quad (5)$$

$$P[\bar{C}] = (1 - P_b^+(\gamma))^m \quad (6)$$

其中，对于 2-DH1， $m=464$ ；对于 2-DH3， $m=2968$ ；对于 2-DH5， $m=5464$ ；对于 3-DH1， $m=696$ ；对于 3-DH3， $m=4448$ ；对于 3-DH5， $m=8200$ 。

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，

$$P[\bar{C}] = (15P_b(\gamma_f)(1 - P_b(\gamma_f))^{14} + (1 - P_b(\gamma_f))^{15})^m \quad (7)$$

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

4 3种调制方式在 AWGN 信道下的位错误率

蓝牙 1.2 规范的所有数据分组都采用 GFSK 调制方式，

蓝牙 2.0+EDR 新规范增加的 2-DH, 3-DH 数据分组的接入码与分组头采用的也是 GFSK 调制方式。但是，2-DH 数据分组的载荷部分使用的是 1/4-DQPSK 调制方式；3-DH 数据分组的载荷部分使用的是 8DPSK 调制方式。

4.1 GFSK 调制方式下的位错误率

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^[5]，

$$\rho = \frac{\sin(2\pi h)}{2\pi h} \quad (8)$$

定义 2 个常数 a 与 b ：

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

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

4.2 1/4-DQPSK 调制方式下的位错误率

1/4-DQPSK 是一个八相调制方案，可以认为是 2 个正交调制方案，给定符号调制一个正交载波集合；下一个符号调制另一个与第 1 个相差为 1/4 弧度的正交载波集合。文献[5-6]中给出了 1/4-DQPSK 比特错误率的近似式为

$$P_b^*(\gamma) = Q(\sqrt{1.1716\gamma}) \quad (11)$$

4.3 8DPSK 调制方式下的位错误率

计算 8DPSK 的错误率的精确值比较困难，但 DPSK 的噪声方差是 PSK 的 2 倍，因此，可以近似地认为 DPSK 的性能比 PSK 差 3dB。设 $P_b^*(\gamma)$ 为 8DPSK 调制方式下的位错误率^[5]，则

$$P_b^*(\gamma) = \frac{2}{3} Q(\sqrt{6(\gamma - 3)}) \cdot \sin \frac{\pi}{8} \quad (12)$$

5 蓝牙广播性能分析

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

$$1 - P_r(\gamma_1) \cdot P_r(\gamma_2) \dots P_r(\gamma_n) \geq 99\% \quad (13)$$

其中， γ_i 为第 i 个发送分组的瞬时 SNR，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^[5]，则

$$1 - \bar{P}_r(\bar{\gamma})^n \geq 99\% \quad (14)$$

其中， $\bar{\gamma} = E\{\gamma\}$ ，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：

$$n \geq \log_{\bar{P}_r(\bar{\gamma})} (1 - 99\%) \quad (15)$$

其中， 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 的函数为

$$R = \frac{\text{净荷长度}}{\text{分组传输时间}} = \frac{K}{D \cdot n \cdot 625 \times 10^{-6}} \quad (16)$$

其中， D 为包括返回分组的每次传输所占用的时隙数 (DM1/DH1 占用 2 个时隙，DM3/DH3 占用 4 个时隙，DM5/DH5 占用 6 个时隙)； K 为分组中数据位的大小 (DM1 占 136b，DM3 占 968b，DM5 占 1 792b，DH1 占 216b，DH3 占 1 464b，DH5 占 2 712b，2-DH1 占 432b，2-DH3 占 2 936b，2-DH5 占 5 432b，3-DH1 占 664b，3-DH3 占 4 416b，3-DH5 占 8 168b)。

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 $\bar{P}_r(\bar{\gamma}) = P_r(\gamma)$ 。

图 1 表示在不同的信噪比下，蓝牙 2.0+EDR 各数据分组达到 99% 的广播成功率的最大传输吞吐量。以 3-DH5 数据类型为例，当信道信噪比大于 26dB(图 1 中 A 点)时，要达到 99% 广播成功率只须传输一次，无须重传；当信噪比小于 26dB 大于 22dB(图 1 中 B 点)时，需要对该数据包进行一次重传，才能达到 99% 广播成功率。

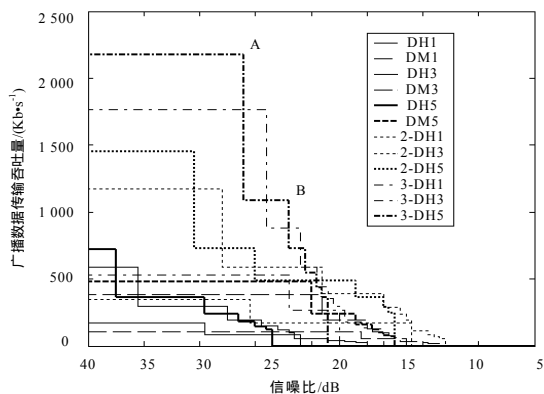


图 1 最大传输吞吐量

表 2 表示在不同的信噪比下，要达到 99% 的广播成功率的蓝牙数据分组选择策略，并且给出了要达到最佳性能的分组重传次数和最大吞吐量。

表 2 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/(Kb·s ⁻¹)
26<SNR	3-DH5	1	2 178.1
[24, 26]	3-DH3	1	1 766.4
[22, 24]	3-DH5	2	1 089.1
[21, 22]	3-DH3	2	883.2
[20.5, 21]	3-DH5	3	726
[19, 20.5]	2-DH3	2	587.2
[16, 19]	2-DH5	3	482.8
[13.5, 16]	2-DH3	3	391.5
[12, 13.5]	2-DH3	4	289.1
[11.5, 12]	2-DH3	5	234.9
[11, 11.5]	2-DH3	6	195.8
[9.5, 11]	2-DH1	3	115.2
[9, 9.5]	2-DH1	4	86.4
[8.5, 9]	2-DH1	5	69.12
[8, 8.5]	2-DH1	6	57.6

(上接第 22 页)

5 结论和下一步的研究

本文从 WSDL 和 BPEL4WS 与 B 抽象机的映射关系入手，讨论了从这两种 XML 格式的文档到 B 抽象机的映射关系，以及从它们到 B 抽象机的转换，实现了形式化方法的建模；然后利用 B 方法相对成熟和完善的验证工具，如 ProB，对模型进行正确性检验。

下一步的工作中，需进一步完善 WSDL 和 BPEL4WS 到 B 抽象机的映射关系；并且通过单一服务的 B 模型，能够自动生成业务过程的 B 模型，从而自动生成 BPEL4WS 文档。

图 2 体现了在表 2 的数据分组选择策略和各种信噪比下蓝牙 2.0+EDR 能够实现的最大的广播速率。

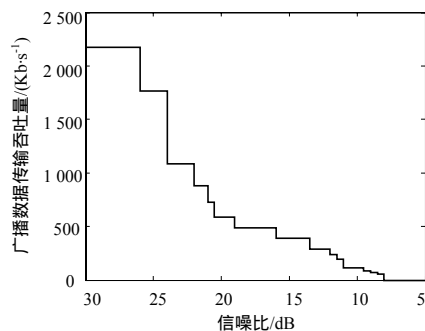


图 2 最大广播速率

6 结论

本文对蓝牙 2.0+EDR 新规范的 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为信道模型，分析了蓝牙广播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广播传输吞吐量的分组选择策略。仿真结果表明，当信噪比较低的时候，蓝牙的广播性能有非常明显的下降，因此，下一阶段将对提高蓝牙在较低信噪比下的广播性能进行研究。

参考文献

- 1 Bluetooth SIG. Specification of the Bluetooth System (Version 1.2)[Z]. (2004-05). <http://www.bluetooth.com>.
- 2 Bluetooth SIG. Specification of the Bluetooth System (Version 2.0)[Z]. (2005-10). <http://www.bluetooth.com>.
- 3 Stranne A, Edfors O, Molin B A. Throughput Dependence on Packet Length in Bluetooth Network[C]//Proc. of RVK'05, Linköping. 2005.
- 4 Matthew C. West Virginia University Morgantown on the throughput of Bluetooth Data Transmissions[C]//Proc. of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. 2002: 119-123.
- 5 Proakis J. Digital Communications[M]. New York: McGrawHill, Inc. 2001.
- 6 Miller C, Lee J. BER Expressions for Differentially Detected /4-DQPSK Modulation[J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46(1): 71-81.

参考文献

- 1 Abrial J R. The B Book—Assigning Programs to Meanings[M]. U.K.: Cambridge University Press, 1996.
- 2 Leuschel M, Butler M. Automatic Refinement Checking for B[C]//Proceedings of ICFEM'05. 2005.
- 3 Butler M, Leuschel M, Snook C. Tools for System Validation with B Abstract Machines[C]//Proc. of the 12th International Workshop on Abstract State Machines, Paris. 2005.
- 4 Leuschel M, Butler M. ProB: A Model Checker for B[C]//Proceedings of Formal Methods Europe, Pisa, Italy. 2003: 855-874.