

载荷长度对蓝牙数据传输吞吐量的影响

徐 飞, 庄奕琪, 郭 锋

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

【摘要】 蓝牙协议提供了多种不同长度的数据包类型, 以提高在不同的信道条件下的数据传输性能。针对这一特性, 该文建立了噪声环境下蓝牙数据传输系统的数学模型, 分析了蓝牙高频移键控(GFSK)调制方式和2.0+EDR规范新增加的 $\pi/4$ -DQPSK与8DPSK调制方式, 根据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, 进而分析了在不同的信噪比条件下载荷长度对蓝牙数据传输吞吐量的影响。仿真分析结果对如何提高蓝牙数据传输性能的研究提供了有益的参考。

关键词 蓝牙; 信噪比; 载荷长度; 数据传输吞吐量
中图分类号 TN918; O332 **文献标识码** A

Payload Length Effect on Bluetooth Data Transmission Throughput

XU Fei, ZHUANG Yi-qi, GUO Feng

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

Abstract There are several kinds of packet types in Bluetooth specification to enhance the data transmission performance in different noisy channels. In this paper, a Bluetooth data transmission mathematical model in noisy environments is presented. The relations between bit error rate and average received signal-to-noise ratio(SNR) in additional white gaussian noise (AWGN) channel are derived for gaussian frequency shift keying (GFSK) modulation and new $\pi/4$ -DQPSK and 8DPSK modulations adopted in Bluetooth 2.0+EDR specification. The function expressions of packet retransmission probability and average received SNR of asynchronous connection-oriented (ACL) data packets are put forward. The impact of payload length on Bluetooth data transmission throughput is obtained at last. Simulation results contained in this paper can be served as a good benchmark against researches on how to enhance Bluetooth data transmission throughput.

Key words Bluetooth; signal-to-noise ratio; payload length; data transmission throughput

蓝牙技术作为无线个域网(wireless personal area network, WPAN)的典型代表, 由于其低成本、低功耗、抗干扰能力强等优点, 在近年来得到了越来越广泛的应用。蓝牙工作在2.4 GHz的ISM频段, 当同一区域有别的蓝牙散射网(scatternet)或者无线局域网(802.11b)同时工作时, 会对蓝牙数据传输产生干扰, 导致有的数据分组不能正确接收, 产生一定的丢包率, 进而影响蓝牙数据传输性能。影响丢包率的因素有: 产生干扰的设备数量和其传输载流量、干扰源的距离、蓝牙收发系统的功率、蓝牙数据分组的长度等^[1-2]。

文献[3-7]对噪声环境下蓝牙数据传输性能进行了分析和研究。对蓝牙数据传输性能的研究都是对蓝牙数据分组作为一个整体来进行研究的, 忽略了载荷长度对数据传输吞吐量的影响。针对这一方面

的不足, 本文研究了在噪声环境下蓝牙数据分组长度与数据传输吞吐量之间的关系, 以加性高斯白噪声(additional white gaussian noise, AWGN)信道为信道模型, 分析了在不同信噪比的干扰状态下, 蓝牙数据载荷长度对数据传输吞吐量的影响。

1 蓝牙2.0+EDR不同调制方式下的位错误率分析

蓝牙新规范Bluetooth2.0+EDR(增强数据速率)提高了数据传输速率并降低了功耗。新规范增加了六种新的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似, 但载荷部分分别使用 $\pi/4$ -DQPSK(相对四相移键控)与8DPSK(八相差分移键控)调制方式^[2], 其接入码和分组头还是

收稿日期: 2007-06-06; 修回日期: 2007-09-18

基金项目: 国家自然科学基金(60276028)

作者简介: 徐 飞(1980-), 男, 博士生, 主要从事短距离无线通信信号完整性分析方面的研究。

使用跟蓝牙1.2协议相同的高斯频移键控(gaussian frequency shift keying, GFSK)调制方式。其分组特性如表1所示。

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
AUX1	0-29	无	无	185.6	185.6
2-DH1	0-54	无	有	345.6	345.6
2-DH3	0-367	无	有	117 4.4	172.8
2-DH5	0-679	无	有	1448.5	115.2
3-DH1	0-83	无	有	531.2	531.2
3-DH3	0-552	无	有	176 6.4	235.6
3-DH5	0-1021	无	有	217 8.1	177.1

1.1 GFSK调制方式下的位错误率分析

当FSK的调制指数小于0.5时, 信号的相关性表示为^[5]:

$$\rho = \frac{\sin(2\pi h)}{2\pi h} \quad (1)$$

定义两个常数 a 与 b :

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

式中 $\rho = \frac{\sin(2\pi h)}{2\pi h}$, $h=0.32$ 为调制指数^[2]。则位错误概率表示为^[5]:

$$P_b(\gamma) = Q_1(a, b) - \frac{1}{2} e^{-(a^2+b^2)/2} I_0(ab) = e^{-\gamma/2} \left\{ \frac{1}{2} I_0(ab) + \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{a}{b}\right)^k I_k(ab) \right\} \quad (3)$$

式中 $Q(a, b)$ 是马库姆(Marcum) Q 函数; $I_0(\cdot)$ 是零阶修正贝塞尔函数。

1.2 $\pi/4$ -DQPSK调制方式下位错误率

$\pi/4$ -DQPSK是一个四相调制方案, 可以认为是两个正交调制方案, 即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一个相差为 $\pi/4$ 弧度的正交载波集合。在文献[8-9]中给出了 $\pi/4$ -DQPSK比特错误率的近似式为:

$$P_b(\gamma) = Q(\sqrt{1.1716\gamma}) \quad (4)$$

1.3 8DPSK调制方式下位错误率

计算8DPSK错误概率的精确值比较困难, 但DPSK的噪声方差是PSK的两倍, 所以可以近似的认为DPSK的性能比PSK差3 dB^[9]。设 $P_b''(\gamma)$ 为8DPSK调制方式下的位错误率^[5], 则:

$$P_b'' = \frac{2}{3} Q(\sqrt{6(\gamma-3)} \sin \frac{\pi}{8}) \quad (5)$$

2 数据分组重传概率分析

本文在分析蓝牙数据分组长度对数据传输吞吐量的影响时, 选取DH3、2-DH3和3-DH3三种数据包类型进行分析, 探讨的是一对主从蓝牙设备链接的情况, 并且以分析主对从设备单向的最大数据传输速率。即只有主设备向从设备发送数据, 从设备只是返回确认信息。若某分组发送后没有收到发送成功的确认信息(ACK), 则ARQ机制将重复发送该分组, 直到发送成功为止。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。当出现以下五种情况之一便会引起分组重传^[10]。

- (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。
- (4) 事件D: 返回分组接入码同步错误。
- (5) 事件E: 返回分组的分组头错误。

数据分组的重传概率分析表达式为:

$$P_r(\gamma) = 1 - P[\bar{A}]P[\bar{B}]P[\bar{C}]P[\bar{D}]P[\bar{E}] \quad (6)$$

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; $\gamma = \{\gamma_f, \gamma_r\}$ 是二元变量, 表示发送与返回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:

$$P[\bar{A}] = \sum_{k=0}^{72-T} \binom{72}{k} (P_b(\gamma_f))^k (1 - P_b(\gamma_f))^{72-k} \quad (7)$$

式中 $P_b(\gamma_f)$ 为发送分组的位错误率。由于返回分组也同样使用72位的接入码, 所以事件D有着类似的概率:

$$P[\bar{D}] = \sum_{k=0}^{72-T} \binom{72}{k} (P_b(\gamma_r))^k (1 - P_b(\gamma_r))^{72-k} \quad (8)$$

式中 $P_b(\gamma_r)$ 为返回分组的位错误率。式(6)与式(7)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

和E发生, (3,1)编码可以纠正一个错误, 因此:

$$P[\bar{B}] = (3P_b(\gamma_f)(1 - P_b(\gamma_f))^2 + (1 - P_b(\gamma_f))^3)^{18} \quad (9)$$

$$P[\bar{E}] = (3P_b(\gamma_r)(1 - P_b(\gamma_r))^2 + (1 - P_b(\gamma_r))^3)^{18} \quad (10)$$

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。对于2.0+EDR规范新增的2-DH与3-DH类型分组, 其接入码和分组头仍然使用GFSK调制方式, 但是其有效载荷部分分别使用 $\pi/4$ -DQPSK与8DPSK调制方式。两种调制方式下的位错误率分别是 $P_b(\gamma)$ 和 $P_b^m(\gamma)$ 。

对于DH3分组:

$$P[\bar{C}] = (1 - P_b^m(\gamma))^m \quad (11)$$

对于2-DH3分组:

$$P[\bar{C}] = (1 - P_b^m(\gamma))^m \quad (12)$$

对于3-DH3分组:

$$P[\bar{C}] = (1 - P_b^m(\gamma))^m \quad (13)$$

式中 m 代表数据分组的载荷长度。

3 载荷长度对吞吐量影响的仿真结果及分析

设随机变量 N 是一个特定的分组成功发送所必须发送的平均次数, 即前 $n-1$ 次发送失败且第 n 次发送成功的平均次数为:

$$\begin{aligned} N &= 1 \times (1 - P_r(\gamma_1)) + 2 \times P_r(\gamma_1)(1 - P_r(\gamma_2)) \\ &\quad + 3 \times P_r(\gamma_1)P_r(\gamma_2)(1 - P_r(\gamma_3)) + \dots = \\ &\quad \sum_{i=1}^{\infty} (i(1 - P_r(\gamma_i)) \prod_{n=1}^{i-1} P_r(\gamma_n)) \end{aligned} \quad (14)$$

式中 γ_i 为第 i 个发送与返回分组的瞬时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^[3], 则:

$$N = \sum_{i=1}^{\infty} i(1 - \bar{P}_r(\bar{\gamma})) (\bar{P}_r(\bar{\gamma}))^{i-1} \quad (15)$$

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:

$$\bar{N} = \frac{1}{1 - \bar{P}_r(\bar{\gamma})} \quad (16)$$

对于任何类型的分组, 不同载荷长度的吞吐量 R 为平均重传次数 \bar{N} 的函数^[3]:

$$R = \frac{\text{净荷长度}}{\text{分组传输时}} = \frac{K}{DN625 \times 10^{-6}} = \frac{K(1 - \bar{P}_r(\bar{\gamma}))}{0.000625D} \quad (17)$$

式中 D 为包括返回分组的每次传输所占用的时隙数(对于 $D \times 1$ 分组为2, $D \times 3$ 分组为4, $D \times 5$ 分组为6); K 为分组中数据载荷的长度。

蓝牙数据传输吞吐量是信噪比和数据载荷长度的函数, 要计算吞吐量 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 $\bar{\gamma} = \gamma$, 而且有 $\bar{P}_r(\bar{\gamma}) = P_r(\gamma)$ 。另外, 根据信道的互易性, 有 $P_r(\gamma_f) = P_r(\gamma_r)$ ^[3]。

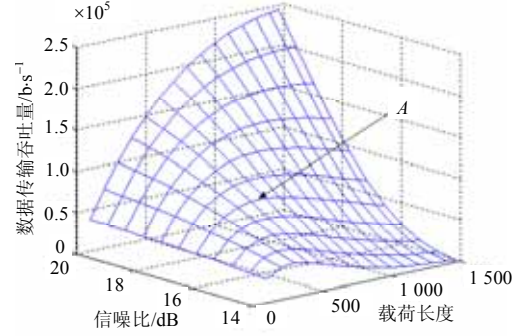


图1 DH3分组数据传输吞吐量与信噪比和载荷长度的关系

图1给出了DH3数据分组在不同的信噪比下吞吐量和载荷长度之间的关系。从图中可以看出, 在信噪比不变的情况下, 数据传输吞吐量与载荷长度并非成正比关系。因为某一分组载荷长度越长则受到干扰的概率也越大, 重传的概率也越高, 进而吞吐量降低。如当信噪比为16.4 dB时, 载荷长度要取568 b(图1中A点), 才能取得最好的传输吞吐量。

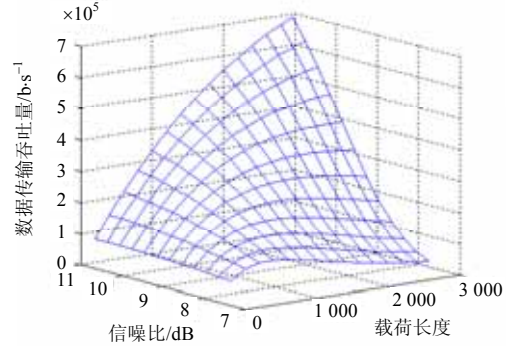


图2 2-DH3分组传输吞吐量与信噪比和载荷长度的关系

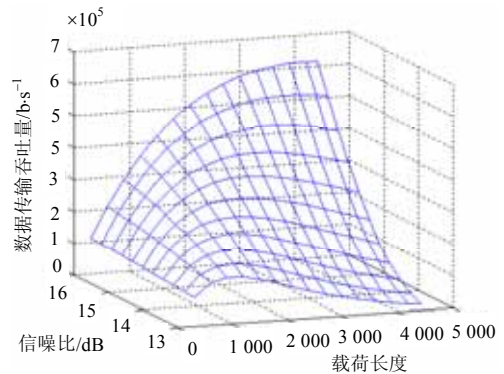


图3 3-DH3分组传输吞吐量与信噪比和载荷长度的关系

图2和图3分别给出了2-DH3和3-DH3数据分组在不同的信噪比下,吞吐量和载荷长度之间的关系。

4 结 论

本文以AWGN为信道模型,研究了蓝牙数据分组长度对吞吐量的影响。分析了蓝牙2.0+EDR新规范用到的GFSK、 $\pi/4$ -DQPSK、8DPSK三种调制方式在AWGN信道下,位错误率与不同信噪比之间的关系,进而推出蓝牙各个数据分组在不同信噪比下的数据传输速率。本文对建立的数学模型进行了仿真,从仿真结果可以发现,并非载荷越长吞吐量就越高,因为在一定的信噪比条件下,数据载荷越长,越容易受到干扰,也就越容易引起重传,从而降低系统传输吞吐量。只有针对不同的信噪比,选取合适的的数据载荷长度,才能达到最高的系统传输吞吐量。

参 考 文 献

- [1] SIG. Specification of the Bluetooth system. Core Version 1.2[S]. [2007-06-06]. <http://www.bluetooth.com>.
- [2] SIG. Specification of the Bluetooth system. Core Version 2.0+EDR[S]. [2007-05-18]. <http://www.bluetooth.com>.
- [3] MATTHEW C. On the throughput of Bluetooth data transmissions[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Orlando, Florida: IEEE, 2002: 119-123.

- [4] SOUISSI S, MEIHOFFER E F. Performance evaluation of a Bluetooth network in the presence of adjacent and cochannel interference[J]. In Proc. IEEE Emerging Technologies Symposium, 2000(10): 1-6.
- [5] LEE E J, YOUN H Y. Efficient scheduling by incorporating bin packing with limited and weighted round robin for Bluetooth[C]// Computational Science and Its Applications - ICCSA. [S.l.]: [s.n.], 2006, (3983): 187-196.
- [6] POPOVSKI P, YOMO H. Energy-efficient operation through interference avoidance for interconnected bluetooth WPANs[J]. Wireless Personal Communications, 2005, (34): 163-187.
- [7] GIANNI P, ROBERTO V. Analytical evaluation of throughput for a Bluetooth piconet with MAC level link adaptation[J]. Mobile Networks and Applications, 2005, 10(2): 717-725.
- [8] RODGER E, ZIEMER, ROGER L, et al. Introduction to digital communication[M]. [S.l.]: Person Education, 2000: 174-187.
- [9] MILLER C, LEE J. BER expressions for differentially detected $\pi/4$ -DQPSK modulation[J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46(1): 71-81.
- [10] KLEINSCHMIDT J H, PELLENZ M E, JAMHOUR E. Bluetooth network performance in Nakagami-m fading channels[C]//IFIP TC6 International Conference on Mobile and Wireless Communications Networks. Singapore: IEEE 2004: 639-644.

编辑 张俊

(上接第16页)

- [5] ELDER Y C, Quantum signal processing[D]. Mass: Inst Technol, 2001.
- [6] TSENG Chien-cheng, HWANG Tsung-ming. Quantum digital image processing algorithms[C]//16th IPPR Conference on Computer Vision, Graphics and Image Processing. [S.l.]: [s.n.], 2003: 827-834.
- [7] WANG Peng, LI Jian-ping. Quantum interpretation of frequency operator[C]//In ICNC'07: Third International Conference on Natural Computation. Haikou and Washington DC: IEEE Computer Society Press, 2007: 613-618.
- [8] WANG Peng, LI Jian-pin. Wavelet denoising by quantum threshold algorithm[C]//In ICIG'07: Proceeding of the Fourth International Conference on Image and Graphics. Chengdu & Washington DC: IEEE Computer Society Press, 2007: 62-66.
- [9] BOGGESS A, NARCOWICH F J. A first course in wavelet with fourier analysis[M]. London: Pearson Education, 2001: 115-180.
- [10] 程正兴. 小波分析算法与应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998: 20-33.

编辑 熊思亮