

改善蓝牙匹克网数据传输的 MSK 方法

张超¹ 庄奕琪¹ 徐飞¹ 吕天然²

(西安电子科技大学微电子学院宽禁带半导体材料与器件重点实验室 西安 710071)¹

(河南大学计算机与信息工程学院 开封 475004)²

摘要 蓝牙协议规定的调制方式需要在较高的传输信噪比下才能有效地进行数据传输。MSK 调制解调方法能有效提高低信噪比情况下的无线通信的可靠性。建立了蓝牙数据传输系统的数学模型,推导了蓝牙数据分组传输吞吐率和平均接收信噪比之间的函数表达式;分析了几种调制方式在高斯加性白噪声信道中的数据传输性能,证明了使用 MSK 方法可以有效提高蓝牙匹克网在噪声信道中的数据传输性能。仿真结果支持了前面的结论,对于改善蓝牙匹克网在噪声信道中数据传输性能的研究提供了参考。

关键词 蓝牙,数据传输,数据吞吐量,MSK

中图分类号 TN918, O332 **文献标识码** A

Method of Improving Bluetooth Piconet Data Transfer by MSK Modulation

ZHANG Chao¹ ZHUANG Yi-qi¹ XU Fei¹ LU Tian-ran²

(Key Laboratory of Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices, School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China)¹

(College of Computer and Information Engineering, Henan University, Kaifeng 475004, China)²

Abstract The Bluetooth piconet needs better average channel SNR (received signal-to-noise ratio) in order to transmit data effectively in different channels with the modulation methods in Bluetooth specification. The MSK modulation method could improve the data throughput performance of wireless communication in noisy environment efficiently. The Bluetooth data packet transmission mathematical model was built; the relations of Bluetooth piconet data throughput and the average channel SNR were derived. The corresponding functions were deduced. The data transmission performance with the MSK method and modulation methods in Bluetooth specification was analyzed. The MSK modulation method can improve the Bluetooth piconet data transmission throughput in low SNR environment. The simulation result proved the conclusion.

Keywords Bluetooth, Data transmission, Data throughput, MSK

1 前言

蓝牙(Bluetooth)是一种短距离无线通信的开放性全球规范。其以低成本、低功耗等特点,得到了广泛应用。蓝牙工作在 2.4GHz ISM 频段,采用跳频扩频和分时复用的方式组成匹克网(piconet)工作。由于 ISM 频段的开放性,越来越多的无线设备工作在其中,当众多设备在同一区域工作时,其他无线设备会对蓝牙匹克网数据传输产生较大影响,造成数据包严重丢失,进而影响其数据传输性能。虽然蓝牙协议采用了多种技术来提高蓝牙匹克网的数据传输吞吐量,但是由于蓝牙本身的发射功率小,又是瞬时窄带信号,而其他工作在 ISM 频段的设备都是大功率、宽频带的信号,因此在大量设备一起工作的情况下,蓝牙数据吞吐量受影响十分严重。

文献[1-3]中分析和研究了衰落情况和与 802.11x 设备共存情况下蓝牙的数据传输性能。其中对蓝牙传输性能的研究

主要都是针对信道特性和蓝牙基带协议本身进行讨论,但是都没有涉及蓝牙系统的位错误率性能。而位错误率性能又直接影响蓝牙数据传输的性能。本文研究了蓝牙数据传输吞吐量与系统位错误率性能之间的关系,在加性高斯白噪声信道模型中,分析了 MSK 调制解调方法与蓝牙现有调制解调对蓝牙数据传输吞吐量的影响。

2 蓝牙匹克网数据传输吞吐量分析

因为蓝牙匹克网使用的是分时复用的主从链接工作方式^[4],所以整个匹克网的数据吞吐量可以简单地用任意时刻的蓝牙主从链接的数据吞吐量来表征,因此以下讨论转换为对于一对蓝牙链接的数据传输吞吐量的分析。蓝牙进行数据传输采用的分组发送方式是,在每个跳频时隙内发送分组,使用重传机制来保证数据传输的可靠性,因此蓝牙数据分组的重传概率是影响蓝牙数据传输吞吐量的主要因素。

到稿日期:2008-10-27 返修日期:2008-12-30

张超(1980-),男,博士研究生,主要研究方向为短距离无线通信集成电路设计, E-mail: zhangchaodx@126.com; 庄奕琪(1957-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为系统芯片 Soc 设计、半导体噪声和可靠性等; 徐飞(1980-),男,博士研究生,主要研究方向为通信系统集成; 吕天然(1988-),男,主要研究方向为计算机信息采集与处理。

2.1 蓝牙数据分组重传概率分析

蓝牙分组由 ACL 和 SCO 链路传输,分别用于传输数据和语音,由于 SCO 链路传输语音不使用重传机制,而且速率恒定,因此对于蓝牙分组重传概率的分析仅仅是 ACL 数据分组。蓝牙最新协议 2.1 规定的 ACL 数据分组特性如表 1 所列^[4]。

表 1 蓝牙 2.0 协议 ACL 数据分组

分组类型	用户载荷/Byte	FEC	CRC	对称传输速率/kbps	非对称传输速率/kbps	
					前向	反向
DM1	0-17	2/3	有	108.8	108.8	108.8
DH1	0-27	无	有	172.8	172.8	172.8
DM3	0-121	2/3	有	258.1	382.7	54.4
DH3	0-183	无	有	390.4	585.6	86.4
DM5	0-224	2/3	有	286.7	477.8	36.3
DH5	0-339	无	有	433.9	723.2	57.6
AUX1	0-29	无	无	185.6	185.6	185.6
2-DH1	0-54	无	有	345.6	345.6	345.6
2-DH3	0-367	无	有	782.9	1174.4	172.8
2-DH5	0-679	无	有	869.7	1448.5	115.2
3-DH1	0-83	无	有	531.2	531.2	531.2
3-DH3	0-552	无	有	1177.6	1766.4	235.6
3-DH5	0-1021	无	有	1306.9	2178.1	177.1

本文在分析蓝牙 ACL 数据分组重传的概率时,探讨的是仅有一对蓝牙设备单向进行数据传输的情况,即仅主设备向从设备发送数据,从设备返回确认信息(ACK)。如果主设备没有收到确认信息则重传机制启动进行重传,直到收到确认信息为止。假设在分组进行传输的过程中,信道的瞬时信噪比恒定,并且校验和检错机制总能发挥作用。

蓝牙协议的重传机制主要依靠接入码的同步、分组头的校验(HEC)、载荷的校验(CRC)以及前向纠错(FEC)几部分来控制,如果其中任何一步无法通过就启动重传,那么概括来说如果出现下面几种情况蓝牙系统将进行重传^[1,5]:

- 事件 A:接收端接收到的分组,分组头接入码同步错误;
- 事件 B:接收端接收到分组,分组头校验报错;
- 事件 C:接收端接收到分组,分组载荷校验报错;
- 事件 D:发送端收到的返回分组,分组头接入码同步错误;
- 事件 E:发送端收到的返回分组,分组头校验错误。

那么蓝牙数据分组重传的概率分析表达式为:

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

式中, $\bar{A}$ 代表A事件的补, $P[\bar{A}]$ 表示A事件不发生的概率; $\gamma = \{\gamma_i, \gamma_r\}$ 是二元变量,表示发送分组和接收分组所处信道的瞬时信噪比。

蓝牙接收单元的相关器将接收到的分组与已存储的接入码进行相关运算,当相关器的输出超过一个门限值,分组即被同步,也就是说72位的接入码中要有N位被正确接收才能同步,即接入码中要有少于72-N个错误分组才能同步成功,因此:

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

式中, $P(\gamma_i)$ 为发送分组时信道瞬时误比特率。因为接收分组同步机制与发送相同,所以事件D不发生的概率为:

$$P[\bar{D}] = \sum_{k=0}^{72-N} \binom{72}{k} (P(\gamma_r))^k (1-P(\gamma_r))^{72-k} \quad (3)$$

式中, $P(\gamma_r)$ 为接收分组时信道瞬时误比特率。根据蓝牙 2.1 协议^[4]规定,上述式(2)和式(3)中N取65。

分组头经过每位数据重复3次的1/3FEC纠错编码以后,如果HEC校验报错就会导致事件B、E发生;因为分组头有18位,而且1/3FEC可以每3位纠正一位的错误,所以有:

$$P[\bar{B}] = (3P(\gamma_i)(1-P(\gamma_i))^2 + (1-P(\gamma_i))^3)^{18} \quad (4)$$

$$P[\bar{E}] = (3P(\gamma_r)(1-P(\gamma_r))^2 + (1-P(\gamma_r))^3)^{18} \quad (5)$$

事件C发生的概率最大,由于假设CRC校验可以检出所有错误,那么如果是DHx分组和AUX分组,任意一位出错就会发生C事件,所以有:

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

如果是DM分组,因为使用了2/3FEC纠错,载荷经过(15,10)截短汉明编码,每15位可以纠正一位误码,那么有:

$$P[\bar{C}] = (15P(\gamma_i)(1-P(\gamma_i))^{14} + (1-P(\gamma_i))^{15})^{\lceil \frac{8 \cdot m + 16}{10} \rceil} \quad (7)$$

式中,m为分组载荷长度。

2.2 蓝牙数据吞吐量分析

假设随机变量N是一个分组成功发送所必须的平均重传次数,即前n-1次发送都失败第n次发送成功的平均次数,那么:

$$\begin{aligned} \bar{N} &= (1-P(\gamma_1)) + 2P(\gamma_1)(1-P(\gamma_2)) + 3P(\gamma_1)P(\gamma_2) \\ &\quad (1-P(\gamma_3)) + \dots \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} i(1-P(\gamma_i)) \prod_{n=1}^{i-1} P(\gamma_n) \end{aligned} \quad (8)$$

式中, γ_i 为第i个分组发送或接收时信道的瞬时信噪比。因为假设分组与分组间是非相关的,即准静态衰落,分组间的信噪比的概率密度函数相同^[3],则:

$$\bar{N} = \sum_{i=1}^{\infty} i(1-\overline{P(\gamma)}) (\overline{P(\gamma)})^{i-1} \quad (9)$$

式中, $\bar{\gamma}$ 是平均信噪比,对应的 $\overline{P(\gamma)}$ 为平均误比特率。进一步推导可得:

$$\bar{N} = \frac{1}{1-\overline{P(\gamma)}} \quad (10)$$

对于任意类型的数据分组,不同载荷长度的吞吐量R是平均重传次数N的函数:

$$R = \frac{\text{净荷长度}}{\text{分组传输时间}} = \frac{K}{D \cdot N \cdot 625 \cdot 10^{-6}} = \frac{K(1-\overline{P(\gamma)})}{0.000625D}$$

式中,D是每个数据分组发送完成所需要的时隙数(D×1分组是2,D×3分组是4,D×5是6);K是分组中数据载荷的长度。

3 调制方法对蓝牙吞吐率的影响

蓝牙数据吞吐量是信噪比和载荷长度的函数,要计算吞吐量就必须求出平均误比特率 $\overline{P(\gamma)}$ 的值。在AWGN信道中瞬时信噪比等于平均信噪比 $\gamma = \bar{\gamma}$,而且有 $P(\gamma) = \overline{P(\gamma)}$ 。另外根据信道互易性,有 $P(\gamma_i) = P(\gamma_r)$ ^[3]。蓝牙的信道传输瞬时误比特率则由采用的调制解调方式决定。

3.1 蓝牙现有调制解调方法误码率分析

蓝牙 2.0+EDR 协议规定采用的调制解调方式有3种:GFSK,π/4-DQPSK,8DPSK。其中后两种调制解调方式仅仅对应ACL分组中2-DHx和3-DHx分组的载荷部分,其他所有分组和上面两类分组的分组头部分都是使用GFSK调制

方式。

3.1.1 GFSK 调制

蓝牙采用的 GFSK 调制方式, $BT=0.5$ (B 是信号的 3dB 带宽, T 是一个码元的持续时间), 调制指数 $h=0.28 \sim 0.35$ ^[4]。因为是在 AWGN 信道中进行分析, 那么采用同步检测法解调^[6,7], 可以得到系统总的误比特率为:

$$P(\gamma) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{k\gamma/2}) \quad (11)$$

式中, γ 是信道瞬时信噪比, $\operatorname{erfc}(x)$ 是互补误差函数。因为 $BT=0.5$, 所以可近似化简得 $k = \pi * \operatorname{erf}^2(\sqrt{\pi^2/2\ln 2})/16$ 。这样就可以近似得到误比特率:

$$P(\gamma) \approx \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{0.308\gamma}) \quad (12)$$

3.1.2 $\pi/4$ -DQPSK 调制方法

$\pi/4$ -DQPSK 是四相调制方案, 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于前者相差为 $\pi/4$ 弧度的正交载波集合。在文献[8,9]中给出了 $\pi/4$ -DQPSK 位错误率近似为:

$$P'(\gamma) \approx Q(\sqrt{1.1716\gamma}) \quad (13)$$

式中, $Q(x)$ 是马库姆 (Marcum) Q 函数。

3.1.3 8DPSK 调制方法

8DPSK 调制方式位错误率的精确计算比较困难, 但是 DPSK 的噪声方差是 PSK 的两倍, 所以可以近似认为 DPSK 的性能比 PSK 的差 3dB^[8], 那么可得 8DPSK 调制的位错误率为^[10]:

$$P''(\gamma) = \frac{2}{3} Q(\sin \frac{\pi}{8} \sqrt{6(\gamma-3)}) \quad (14)$$

3.2 蓝牙使用 MSK 调制方法的位错误率分析

分组类型不变, 使用 MSK 调制方法作为蓝牙现有调制方法的替代, 信号的表达式为^[11,12]:

$$S_{\text{MSK}}(t) = \cos(\omega_c t + \frac{\pi}{2T_s} a_k t + \varphi_k) \quad (k-1)T_s \leq t \leq T_s \quad (15)$$

式中, ω_c 是载波频率; T_s 是码元宽度; a_k 是第 k 个码元的信息, 取值为 ± 1 ; φ_k 是第 k 个码元的相位常数, 作用是为了保证相位连续。在 AWGN 信道中分析, 那么接收端接收到的信号可以表示为:

$$r(t) = A \cos(\omega_c t + \frac{\pi}{2T_s} a_k t + \varphi_k) + n(t) \quad (16)$$

经过与本地参考信号相乘、滤波和取样之后, 两个支路的采样值分别是:

I 支路:

$$A \cos \varphi_{2m} + (-1)^m n_c, t = 2mT_s \quad (17)$$

Q 支路:

$$A a_{2m+1} \cos \varphi_{2m+1} + (-1)^m n_s, (t = 2m+1)T_s \quad (18)$$

式中, m 是大于 0 的整数, n_c 和 n_s 是 $n_c(t)$ 和 $n_s(t)$ 在取样时刻的样本值。那么在各支路数据等概的情况下, 其误比特率相同^[12], 为:

$$P(\gamma) = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp(-\frac{(x-A)^2}{2A^2}) dx = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\gamma}) \quad (19)$$

式中, $r = \frac{A^2}{2\sigma^2}$ 是信噪比。经过差分解码以后, 系统总的误比特率为^[12]:

$$P_e = 2P_s(1-P_s) \quad (20)$$

近似可得:

$$P(\gamma) \approx \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{0.85\gamma}) \quad (21)$$

4 MSK 方法对数据吞吐量的影响与分析

由于 $\pi/4$ -DQPSK 和 8DPSK 仅仅应用于少数分组的载荷部分, 且只对前述的事件 C 有影响, 出于全局考虑, 对比分析仅仅停留在 GFSK 和 MSK 两种方法在 AWGN 信道中对蓝牙吞吐率的影响。

图 1 是理论上蓝牙使用不同数据分组在 AWGN 信道中的吞吐率, 由图可见, 对于没用使用纠错机制的 DHx 分组, 虽然吞吐率较高, 但是要求传输过程中信道信噪比至少要大于 20dB, 否则吞吐率优势无从体现。

图 2 是使用 MSK 方法的蓝牙系统在 AWGN 信道中的吞吐率情况, 和图 1 比较, 对于使用 2/3FEC 纠错的 DMx 低速分组, 效果并不明显; 但是对于高速传输的 DHx 分组, 抗干扰的能力提高了约 12dB。

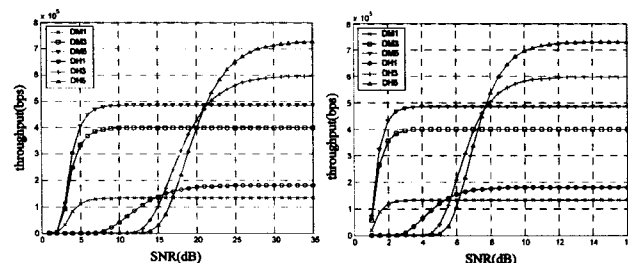


图 1 标准蓝牙系统吞吐率

图 2 MSK 蓝牙系统吞吐率

结束语 蓝牙采用了跳频扩频的通信方式, 实质上仍然采用的是瞬时窄带无线通信, 而其他工作在 ISM 频段的设备相对于蓝牙来说至少频带宽度要高一个数量级, 近似地认为是白噪声, 进而可以认为是信噪比情况不理想的 AWGN 信道。在这种情况下使用 MSK 方法可以有效提高蓝牙匹克网的数据吞吐性能。

本文研究了在 AWGN 信道模型中, 蓝牙数据吞吐率与调制解调方法之间的关系。分析了现有蓝牙在 AWGN 信道中位错误率和吞吐率之间的关系, 并进一步推导得到了数据重传概率和吞吐率的一系列模型。然后将 MSK 调制解调方法应用到蓝牙系统中, 建立数学模型并进行仿真, 结果显示在低信噪比、外部干扰严重的情况下使用 MSK 调制方法能为蓝牙使用高速分组提供较高的抗干扰能力, 从而较大地提升蓝牙匹克网的数据传输吞吐率。

参考文献

- [1] Valenti Lane C. On the throughput of Bluetooth data transmissions[C] // IEEE Wireless Communications and Networking Conference, dept. of West Virginia University Morgantown, Orlando: IEEE, 2002: 119-123
- [2] Pasolini G, Verdone R. Analytical Evaluation of Throughput for a Bluetooth Piconet Adaptation[J]. Special Issue on WLAN Optimization at the MAC and Network Levels, Journal on Special Topics in Mobile Networking and Applications (KLUWER), 2005, 10(5): 717-725

实现了系统级 SFMEA 辅助工具,该工具主要包括以下几个主要功能:用户登录、功能单元管理、功能流程管理、SFMEA 记录管理、失效模式管理、失效案例管理、报告生成,每个功能描述如下:

- (1)用户登录功能:通过口令检查的方式验证用户是否有权限登录本系统;
- (2)功能流程管理:实现对功能流程图的功能单元的增、删和修改,以树状形式描述功能流程图的层次结构;
- (3)功能单元管理:实现对功能单元建模信息(如:功能单元名称、输入变量、输出变量、下一层次功能集合等)的增、删和修改;
- (4)SFMEA 记录管理:对 SFMEA 工作表中的内容实现增、删和修改功能;
- (5)失效模式管理:提供一个通用的失效模式库,可以根据需要对失效模式库进行增、删和修改,以满足实际应用的需要;
- (6)失效案例管理:对以往某个失效模式下的失效案例进行管理,包括失效案例的增、删和修改。

图 4 为 SFMEA 辅助工具的功能流程图。

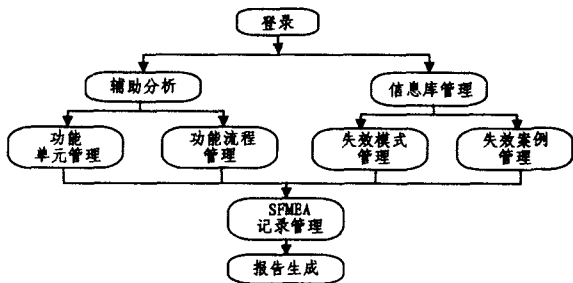


图 4 功能流程图

该工具已在多个系统级 SFMEA 中应用,通过友好界面引导分析人员完成系统级 SFMEA 的分析过程,最后生成图 5 所示的系统级 SFMEA 报表。

序号	失效模式名称	失效模式描述	失效原因	失效影响	第一级故障影响	第二级故障影响
1	进给模式启动	对一个错误的输入信号	需要设计文...	无影响	可能意外...	飞机可能...
2	进给模式启动	进给模式启动输出不正确	需要设计文...	无影响	无法控制...	飞机无法...
3	进给模式启动	进给模式不存在故障信号	需要设计文...	可能致命...	无法正确...	可能致命...

图 5 系统级 SFMEA 报表

通过实例应用进一步验证了采用辅助工具进行 SFMEA 分析至少有以下优点:

- (1)分析人员可以方便地参考分类整理的失效模式,并借助工具提供的快捷功能,直接生成失效模式(在此基础上可以

对已经生成的失效模式进行修改),这样可以避免遗漏对某些失效模式的分析(对没有经验的分析人员尤其有效);

- (2)通过辅助工具的向导可以自动生成功能层次图,不仅可以分析人员清楚地了解系统的功能流程,而且通过功能层次图可以关联失效模式间的影响;

- (3)可以更加快捷有效地进行失效模式影响分析及原因定位,分析人员可以利用工具迅速查看相邻层次的分析记录,以及对应的失效模式下已有的失效案例信息,从而给分析人员提供更多的参考;

- (4)最后可以通过辅助工具提供的 SFMEA 报表生成功能,有选择地生成需要的 SFMEA 表,省去了制作 SFMEA 报表的麻烦。

结束语 本文首先在实践过程中细化了 SFMEA 的实施步骤,其次以 SFMEA 分析过程为切入点研究相关辅助设计方法,在方法研究的基础上设计开发了 SFMEA 辅助工具,并对辅助工具进行了实例应用,进一步验证了辅助工具可以协助分析人员进行 SFMEA 分析,提高分析效率,减少分析工作量,提高 SFMEA 效果,极大地推动 SFMEA 的工程应用,后续还需进一步实现 SFMEA 更大程度的自动化。

参考文献

- [1] Ozarin N. Failure Modes and Effects Analysis during Design of Computer Software[C]//Proceedings: International Symposium on Product Quality and Integrity, 2004;201-206
- [2] Hecht H, An Xuegao, Hecht M. Computer Aided Software FMEA for Unified Modeling Language Based Software[C]//Proceedings: International Symposium on Product Quality and Integrity, 2004;243-248
- [3] Tribble A C, Miller S P. Software Safety Analysis of a Flight Management System Vertical Navigation Function-A Status Report[C]//Proceedings of the 22th Digital Avionics Systems Conference, Indianapolis, CA, October 2003;12-16
- [4] John D, Musa. Software Reliability Engineering [M]. China: Machine Press, 2003;1-29
- [5] 吴邦国,唐任仲. 软件 FMEA 技术研究[J]. 机电工程, 2004, 21(3):8-12
- [6] 赵廷弟,孙琳玲,屠庆慈. 计算机辅助 FMECA 软件模型[J]. 北京航空航天大学学报, 2000, 26(1):118-121
- [7] 赵廷弟,曾声奎,康锐. 计算机辅助可靠性设计分析系统研究[J]. 航空学报, 2000, 21(5):206-209
- [8] 陶建峰,王少萍,姚一平. 计算机辅助 FMECA 与 FTA 正向综合分析方法研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2000, 26(6):663-665

(上接第 88 页)

- [3] Matthew C. On the throughput of Bluetooth data transmissions [C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Orlando, Florida; IEEE, 2002;119-123
- [4] Bluetooth SIG. Specification of the Bluetooth System, version 2.1+EDR www.bluetooth.org 2007
- [5] 徐飞,庄奕琪,郭峰. 载荷长度对蓝牙数据传输吞吐量的影响[J]. 电子科技大学学报, 2008, 37(1):39-42
- [6] 樊昌信,詹道庸,徐炳祥,等. 通信原理(第 5 版)[M]. 北京:国防工业出版社, 2001
- [7] 丁龙刚. 蓝牙射频技术的分析与应用[J]. 现代电子技术, 2003, 24:105-106
- [8] Rodger E, Zierner, Roger L, et al. Introduction to digital commu-

- nication [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):71-78
- [10] Lee E J, Younhy. Efficient scheduling by incorporating bin packing with limiter and weighted round robin for Bluetooth[C]//Computational Science and Its Applications-ICCSA. [S. L.]; [s. n.], 2006(3983);187-196
- [11] Simon M K, WANG C C. Differential Detection of Gaussian MSK in a Mobile Radio Environment[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1984, VT-33(4):307-320
- [12] 郭梯云,杨家玮,李建东. 数字移动通信(修订本)[M]. 北京:人民邮电出版社, 2000