

# A Novel Bluetooth Receive System Based on Switched Diversity

Zichen Zhou, Zhenning Shen

Department of Electronic Technique, Engineering College of CAPF, Shanxi Xi'an 710086

**Abstract:** In order to mitigate the effect of fading, a switched diversity scheme with the least implement complexity is proposed for Bluetooth. With no change to the traditional air interface protocol, the proposed scheme requires only one extra antenna and one extra switch to obtain diversity gain. The system statistic properties are analyzed based on statistics theory. The optimal switch threshold under the criteria of minimizing Bit Error probability is given based on the numerical method. Simple in structure and good in compatibility, the switched diversity can improve the performance of Bluetooth efficiently.

**Keywords:** bluetooth; ber ( bit error probability); switched diversity; outage probability; throughput

## 一种基于切换分集的蓝牙接收系统

周子琛, 申振宁

武警工程学院电子技术系, 陕西 西安 710086

**【摘要】**提出了一种硬件最简的切换分集 (Switched Diversity) 方案。该方案不用改变蓝牙空中接口协议, 仅添加一个切换开关和一个天线即可实现分集处理。使用随机信号理论对系统统计特性进行了分析, 利用数值计算方法求解了基于蓝牙比特错误率最小准则下的最佳切换门限。本方案实现简单, 兼容性好, 能有效改善蓝牙在衰落信道下的系统性能。

**【关键词】**蓝牙; 误比特率; 切换分集; 中断概率; 吞吐量

### 1 引言

蓝牙技术是一种定位于短距离无线数据与语音通信的全球开放性技术。其设备工作于 2.4G ISM 频段, 采用跳频技术抵抗信号干扰和信道频率选择性衰落<sup>[1]</sup>。对于无线通信系统而言, 信道衰落是影响系统性能的最主要因素, 而分集接收技术是对抗信道衰落的有效方法<sup>[2]</sup>。文献[3][4]分别从实验和理论的角度研究了双天线强度选择分集对蓝牙误码率、吞吐量以及传输距离的影响。文献[5]设计了一种适用于蓝牙系统的 2×2 多输入多输出 (Multi-Input Multi-Output, MIMO) 方案, 从而提高了蓝牙系统的性能。文献[7]中的蓝牙设备在同一个时隙中使用两个频点同时进行信号发送, 在接收端使用频率分集方案来提高蓝牙系统性能。文献[2][3][4]给出的方案均需对两个天线上的信号进行强度检测和信道估计, 增加了系统的复杂性。而[5][7]给出的方案则改变了蓝牙空中接口规范, 因此基于该方案的蓝牙设备无法与其他蓝牙设备进行通信。

文献[1]指出蓝牙设备本身具有信道估计功能, 因此对于切换分集而言, 只需要添加一个二选一开关和一个天线就可

以完成分集处理。从而最大限度地降低了设备复杂度, 同时兼容于现有的蓝牙设备。本文首次从理论和仿真的角度研究了基于切换分集的蓝牙系统, 对该系统在瑞利衰落信道下的误码率、平均分组错误率、中断概率等系统性能指标进行了分析。

### 2 蓝牙在高斯白噪声信道下的系统性能

本文仅研究主对从单向的最大数据传输速率, 即只有主设备 (Master) 向从设备 (Slave) 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。文献[8]指出, 若 CRC 校验码能提供正确的错误检测, 且各分组在传送期间内信道质量保持不变, 则蓝牙系统吞吐量为

$$R = K(1 - \bar{P}_R(\bar{\gamma})) / 0.000625 D \quad (1)$$

$\bar{\gamma}$  为输入信号的平均信噪比;  $\bar{P}_R(\bar{\gamma})$  为  $\bar{\gamma}$  所对应的平均重传概率, 它是系统误比特率的函数; 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为分组中数据比特的大小。蓝牙2.1+EDR规范中使用了三种调制方式: GFSK、 $\pi/4$ -DQPSK和8DPSK调制, 其精确误比特率的数学表达式比较复杂, 在高斯白噪声信道下尚可使用其进行系统性能分析; 但在衰落信道环境中, 使用精确数学表达式进行分析较为复杂。本文提出可使用(2)式的误比特率形式对GFSK、 $\pi/4$ -DQPSK和8DPSK调制信号的误比特率进行近似, 从而降低理论推导和数学计算的复杂度。与文献[4]中的近似公式相比, (2)式增加了一个参量c, 从而能够更好的逼近各种调制系统的理论值。

$$P_b(\gamma) \approx a \cdot \exp(-(\gamma/b)^c) \quad (2)$$

对应于 GFSK、 $\pi/4$ -DQPSK 和 8DPSK 调制, 根据其理论曲线, 采用(2)式进行拟合运算, 从而可以计算出相应的(a, b, c)的值, 分别为(0.5724, 1.5268, 0.9377)<sup>GFSK</sup>、(0.3182, 1.3064, 0.9416) <sup>$\pi/4$ -DQPSK</sup>和(0.2343, 2.9745, 0.8927)<sup>8DPSK</sup>, 在此假设 GFSK、 $\pi/4$ -DQPSK 和 8DPSK 调制均使用相关解调(对于非相干解调也可进行相应近似, 鉴于篇幅, 此处略去)。

图1为三种调制方式的理论误码率曲线图与(2)式近似误码率的曲线图。从图可知, 三组曲线基本重合, 因此可以使用(2)式进行进一步分析, 从而得到在衰落信道下, 使用切换分集的蓝牙系统性能。

### 3 基于切换分集的蓝牙系统分析

#### 2.1 基于切换分集的蓝牙接收系统模型

本文提出的基于切换分集的蓝牙系统框图如图2所示, 假设蓝牙设备可以正确地估计信道, 以获得当前信道接收信号信噪比。具体切换分集方案如下:

- (1) 主设备发送数据信息;
- (2) 从设备接收信息并对信道情况进行估计得到瞬时信噪比 $\gamma$ ;
- (3)  $\gamma$ 与门限值 $\gamma_T$ 进行比较, 若大于门限值则使用当前天线, 否则激活切换信号输出单元。
- (4) 由切换信号输出单元输出控制信号将接收机切换到另外一路天线之上。
- (5) 主设备发送信号完毕, 接收机保持在当前天线连接状态向主设备发送ARQ信号以回应是否正确接收。

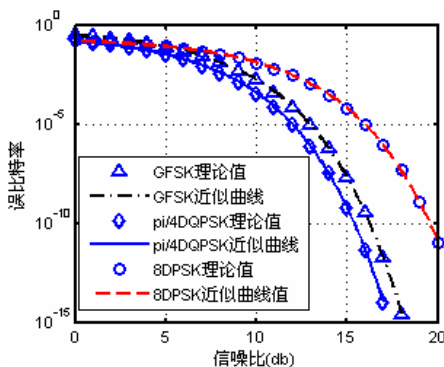


图1. 蓝牙调制方式误码率理论值与近似值曲线图  
Figure 1. BER performance of theory and approximate value

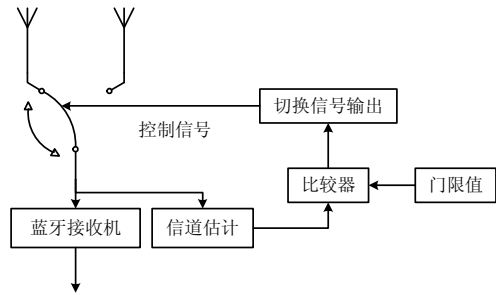


图2. 基于切换分集的蓝牙系统框图  
Figure 2. Diagram of switched diversity Bluetooth

#### 2.2 经过切换分集后输出信噪比的统计特性

##### 2.2.1 输出信噪比的累积分布函数(CDF)

根据图(2), 可以得到SD分集后信噪比 $\gamma_{SD}$ 的累积分布函数可以写成(3)式:

$$P_{\gamma_{SD}}(\gamma) = \begin{cases} P[(\gamma_1 \leq \gamma_T) \text{ and } (\gamma_1 \leq \gamma)], & \gamma \leq \gamma_T \\ P[(\gamma_T \leq \gamma_1 \leq \gamma) \\ \text{or } (\gamma_1 \leq \gamma_T \text{ and } \gamma_2 \leq \gamma_T)], & \gamma \geq \gamma_T \end{cases} \quad (3)$$

假设两个天线上的信号均经历瑞利衰落, 用 $P_\gamma(\gamma)$

表示单个信道输出信噪比的累积分布函数(CDF), 则有:

$$P_{\gamma_{SD}}(\gamma) = \begin{cases} P_\gamma(\gamma_T)P_\gamma(\gamma), & \gamma \leq \gamma_T \\ P_\gamma(\gamma) - P_\gamma(\gamma_T) \\ + P_\gamma(\gamma_T)P_\gamma(\gamma), & \gamma \geq \gamma_T \end{cases} \quad (4)$$

##### 2.2.2 输出信噪比的概率密度函数(PDF)

对于累积分布函数进行微分, 即可得到相应的概率密度函数。

$$p_{\gamma_{SD}}(\gamma) = \begin{cases} P_\gamma(\gamma_T)p_\gamma(\gamma), & \gamma \leq \gamma_T \\ (1 + P_\gamma(\gamma_T))p_\gamma(\gamma), & \gamma \geq \gamma_T \end{cases} \quad (5)$$

在瑞利衰落下, 信噪比 $\gamma$ 的统计特性为

$$p_\gamma(\gamma) = \frac{1}{\bar{\gamma}} \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right) \quad (6)$$

其中 $\bar{\gamma}$ 为平均信噪比。将(6)代入(5)即可获得

瑞利衰落下, 采用切换分集时输出信噪比的概率密度函数:

$$p_{\gamma_{SD}}(\gamma) = \begin{cases} \frac{1}{\bar{\gamma}}(1 - \exp(-\gamma_T/\bar{\gamma}))\exp(-\gamma/\bar{\gamma}), & \gamma \leq \gamma_T \\ \frac{1}{\bar{\gamma}}(2 - \exp(\gamma_T/\bar{\gamma}))\exp(-\gamma/\bar{\gamma}), & \gamma \geq \gamma_T \end{cases} \quad (7)$$

### 3 系统性能与仿真分析

#### 3.1 基于平均输出信噪比最大准则的最佳门限 $\gamma_T^*$ 的确定以及性能分析

$$\overline{\gamma_{SD}} = \int_0^{+\infty} \gamma \cdot p_{\gamma_{SD}}(\gamma) d\gamma = P_{\gamma}(\gamma_T) \overline{\gamma} + \int_{\gamma_T}^{+\infty} \gamma \cdot p_{\gamma}(\gamma) d\gamma \quad (8)$$

对 (8) 式进行微分, 并使微分后的方程等于零, 则可求出对应于平均信噪比  $\overline{\gamma_{SD}}$  最大准则下的最佳门限:

$$\gamma_T^* = \overline{\gamma}. \text{ 将该门限和 (7) 代入 (8) 式中有: } \overline{\gamma_{SD}} = 1.368 \overline{\gamma},$$

即切换分集后可以将平均输出信噪比提高到原来的 1.368 倍。

#### 3.2 系统中断概率 (Outage Probability) 分析

系统中断概率  $P_{OUT}$  是无线通信系统中重要的性能指标, 其定义为系统的输出信噪比小于某个门限值  $\gamma_{TH}$  的概率。根据该定义可以得到中断概率的计算公式

$$P_{OUT} = Prob(\gamma_{SD} < \gamma_{TH}) = P_{\gamma}(\gamma_{TH}) \quad (9)$$

若要求系统中断概率最小, 需对 (9) 做微分运算并令其结果等于零, 可求得最佳切换门限  $\gamma_T^* = \gamma_{TH}$ 。其物理意义表示: 为了使得通信中断概率最小, 在切换分集中应将系统切换门限设置为系统中断信噪比门限  $\gamma_{TH}$ 。此时仅当两路天线上输入的信噪比均小于系统中断信噪比门限  $\gamma_{TH}$  时, 系统通信中断。因此当信道为瑞利衰落信道时, 有下式成立:

$$P_{OUT} = (P_{\gamma}(\gamma_{TH}))^2 = (1 - e^{-\gamma_{TH}/\overline{\gamma}})^2 \quad (10)$$

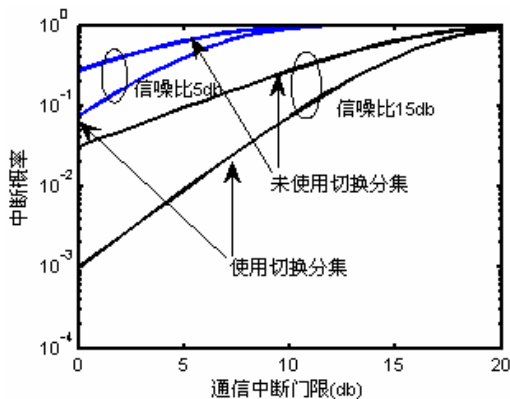


图3. 切换分集系统通信中断概率与中断门限  
Figure 3. Outage probability with switched diversity system

文献[1]要求蓝牙系统比特错误概率小于  $10^{-4}$ , 此时对应于GFSK调制, 系统输入信噪比约为12dB。根据前文可知, 为满足系统中断概率最小而选取的切换门限  $\gamma_{TH} = 12\text{dB}$ 。从图3

可知, 当系统输入平均信噪比为15dB时, 使用切换分集方案的系统中断概率为0.09, 而未使用分集方案的系统中断概率高达0.3。

#### 3.3 基于的误码率最小准则的最佳切换门限及性能分析

对于无线通信系统而言, 只要将其在高斯信道下关于接收信噪比  $\gamma$  的误码率  $P_b(\gamma)$  对  $\gamma$  的概率密度函数做积分即可得到相应的系统平均误码率  $\overline{P_b}(\gamma)$ , 即

$$\overline{P_b}(\gamma) = \int_0^{+\infty} P_b(\gamma) p_{\gamma_{SD}}(\gamma) d\gamma \quad (11)$$

将 (2) 以及 (7) 代入 (11) 式可得

$$\begin{aligned} \overline{P_b}(\gamma) &= \int_0^{+\infty} a \cdot \exp(-(\gamma/b)^c) p_{\gamma_{SD}}(\gamma) d\gamma \\ &= \int_0^{\gamma_T} a \cdot \exp(-(\gamma/b)^c) \cdot \frac{1}{\gamma} (1 - \exp(-(\gamma_T/\overline{\gamma}))) \exp(-\gamma/\overline{\gamma}) d\gamma \\ &\quad + \int_{\gamma_T}^{+\infty} a \cdot \exp(-(\gamma/b)^c) \cdot \frac{1}{\gamma} (2 - \exp(-(\gamma_T/\overline{\gamma}))) \exp(-\gamma/\overline{\gamma}) d\gamma \end{aligned} \quad (12)$$

对应于不同的调制方式, 只需要将文中第二部分对应的 (a, b, c) 值和瑞利衰落信道平均信噪比为  $\overline{\gamma}$  代入 (12) 式, 即可求解出相应的平均误比特率。从 (12) 式可以看出对应于不同的切换门限  $\gamma_{TH}$ , 分集系统误码率有所不同。为了求解对应于误码率最小准则时的切换门限  $\gamma_{TH}$ , 需要对 (12) 中的  $\gamma_T$  变量求导并令其值为零, 以求出最佳  $\gamma_{TH}$  表达式。以上过程无法进行精确的数学推导, 文中采用数值计算方法求出了输入信噪比从 0dB 到 60dB 时系统的最佳切换门限。图 4 为使用蒙特卡罗仿真, 在不同的信噪比下, 取系统最佳切换门限, 得到相应的误比特率曲线。从中可以看出, 当输入信噪比为 30dB 时, 使用切换分集可将系统误比特率从  $10^{-3}$  数量级降低到  $10^{-5}$  数量级。

### 4 结论

本文使用分集接收来提高蓝牙系统在衰落信道下的性能。针对蓝牙设备低成本、低复杂度的特点, 采用了切换分集方案。与传统的蓝牙系统相比, 该系统额外硬件很

少。并未改变蓝牙基带协议，具有很好的设备兼容性。适用于笔记本、PDA 等较大体积设备。根据最佳输出信噪比、最低中断概率和最优误比特率等准则，求解了分集系统的最佳切换门限。对比分析了分集前后的误比特率、中断概率等系统性能指标。仿真结果表明：使用切换分集技术可以有效提高蓝牙在衰落信道下的系统性能。

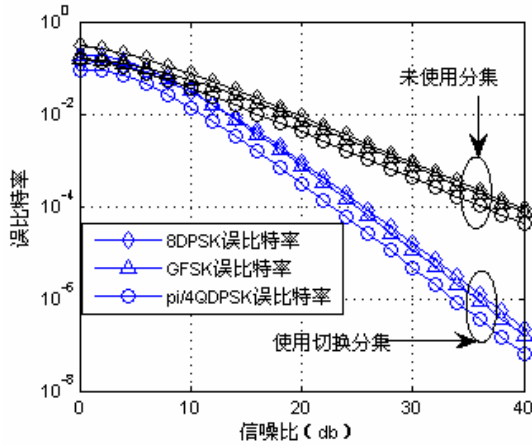


图 4. 蓝牙系统通信误比特率

Figure 4. Brformance with and without diversity

## References(参考文献)

- [1] Bluetooth SIG. Specification of the Bluetooth System. Core V2.1 + EDR <http://www.bluetooth.org>, 2007.7.
- [2] Marvin K. Simon Digital Communication Over Fading Channels New York [M], New York, John Wiley & Sons, Inc. 2000
- [3] Filiz Bektas. Bluetooth communication employing antenna diversity [C] Proc of the 8th IEEE International Symposium on Computers and Communication (ISCC'03), 2003
- [4] Masini, B.M. Exploiting Diversity for Coverage Extension of Bluetooth-based Mobile Dervices [J] Journal onWireless Communications and Networking, Volume 2006
- [5] Elie Jandot dit Danjou. A 2X2 antennas bluetooth system [J] IEEE COMMUNICATIONS LETTERS, VOL. 9, NO. 9, SEPTEMBER 2005: 784-786
- [6] Hong-Chuan Yang, Mohamed-Slim Alouini, Markov Chains and Performance Comparison of Switched Diversity Systems [J] IEEE Transactions onCOMMUNICATIONS, VOL. 52, NO. 7, JULY 2004:1113-1125
- [7] A frequency diversity technique for interference mitigation in coexisting bluetooth and wlan [C] ICC 2007 proceedings. 2007
- [8] 徐飞,BCH 编码对蓝牙数据传输性能改善的分析与仿真[J]. 系统仿真学报 2007,12: 49-52