

基于信道转换的蓝牙微微网之间同频干扰抑制方法

钱志鸿^{*①} 郭雨齐^{①②} 侯金凤^① 王义君^①

^①(吉林大学通信工程学院 长春 130012)

^②(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

摘要: 多个蓝牙微微网之间的同频干扰十分严重,该文针对此问题提出一种基于信道转换的同频干扰抑制方法。该方法在蓝牙微微网重传时进行信道转换,以同频不一定会产生干扰为前提,综合考虑了返回分组、跳频保护间隔、3种时隙分组共存等多种情况,使分析更加接近真实情况。对网络性能指标进行大量仿真,由仿真分析可见,该方法有效地降低了蓝牙微微网的分组错误率,提高了微微网的吞吐量,尤其当网络数量在14~57范围内时,微微网吞吐量最大可增加260 kbps。

关键词: 蓝牙微微网;同频干扰;信道转换;返回分组

中图分类号: TN915.04

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)12-2995-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00634

Co-channel Interference Suppression Method Based on Channel Switching for Bluetooth Piconets

Qian Zhi-hong^① Guo Yu-qi^{①②} Hou Jin-feng^① Wang Yi-jun^①

^①(College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

^②(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Co-channel interference is serious when multiple Bluetooth piconets coexist in a limited area. Therefore, a co-channel interference suppression method based on the channels switching is proposed. With the method, channels may switch from one to another when a piconet carries out retransfer packets. In order to approach practical scenarios and considering that identical frequency channel in different piconets may not lead to co-channel interference, some issues are taken into account in the analysis process, such as the return packets, the frequency hopping guard time, and the coexistence of three packet sizes. Simulations are carried out on the network performance of piconets. The simulation consequence indicates that the methodology can reduce the PER, and the throughput of piconet is improved effectively. And particularly, when the range of piconet number is set from 14 to 57, the throughput can go up 260 kbps.

Key words: Bluetooth piconets; Co-channel interference; Conversion of channel; Return packets

1 前言

蓝牙是一种工作在全球统一开放的 2.4 GHz ISM 频段(Industrial Scientific Medical band)的短距离无线通信技术^[1],容易受到同频段内其他设备的干扰。由于蓝牙微微网之间是互相独立的,因此在微微网比较密集的室内环境,几个相邻微微网同时使用相同频点的概率就会加大,从而产生同频干扰,严重影响蓝牙网络的性能^[2]。

目前,多个蓝牙微微网之间的同频干扰问题是国内外研究的热点。Zurbes 等人^[3]最早分析了蓝牙微微网采用一时隙分组传输时的同频干扰问

题;文献[4,5]将 1, 3, 5 时隙 3 种类型数据分组按不同比例混合进行了分析;文献[6]考虑了蓝牙基带分组的传输环境。除了对同频干扰情况下蓝牙网络性能的分析以外,一些减少微微网间同频干扰的方法也被提出:文献[7]提出了时间同步的方法,文献[8]提出了冲突解决增强型接收机,文献[9]提出了双信道传输(DCT)方法。

以上文献都针对不同因素对蓝牙微微网间的同频干扰问题进行了研究,但是在同频干扰情况下,对蓝牙网络性能的分析还存在以下需要解决的问题:以往文献是在假设微微网之间同频就会产生干扰的前提下进行的分析,没有分析微微网在同频情况下的载干比;以往文献分析的分组错误率实际上是蓝牙微微网间同频的概率,并且没有考虑返回分组是否发送成功;现有的同频干扰抑制方法也是基

2011-06-26 收到, 2011-10-11 改回

国家自然科学基金(60940010, 61071073)和教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20090061110043)资助课题

*通信作者: 钱志鸿 dr.qzh@163.com

于同频就会产生干扰的假设而分析的。为了更好地抑制蓝牙微微网之间的同频干扰问题,本文提出了基于信道转换的同频干扰抑制方法。为了使分析更加完善,该方法根据载干比值判断微微网是否受到同频干扰,并且分析了多个蓝牙微微网之间的同频概率,在同频概率分析过程中考虑了返回分组、跳频保护间隔、3种时隙数据分组共存等多种情况。利用同频概率进一步分析了分组错误率及网络吞吐量。

2 蓝牙干扰模型

蓝牙 DM(Data Medium rate), DH(Data-High rate)分组均采用高斯频移键控(GFSK)调制方式,此调制方式下的比特错误率为

$$\begin{aligned}
 p_b(\gamma) &= Q_1(a, b) - \frac{1}{2} e^{-(a^2+b^2)/2} I_0(ab) \\
 &= e^{-\gamma/2} \left[\frac{1}{2} I_0(ab) + \sum_{k=1}^{\infty} (a/b)^k I_k(ab) \right], \\
 a &= \sqrt{\frac{\gamma}{2} (1 - \sqrt{1 - \rho^2})}, b = \sqrt{\frac{\gamma}{2} (1 + \sqrt{1 - \rho^2})}, \\
 \rho &= \frac{\sin(2\pi h)}{2\pi h} \quad (1)
 \end{aligned}$$

其中 $Q_1(a, b)$ 是马库姆 Q 函数, $I_k(x)$ 是 k 阶修正贝塞尔函数, γ 为比特信噪比, ρ 表示信号的相关性,调制指数 $h=0.32$ ^[10]。

假设蓝牙设备间采用非对称传输方式,并且信道质量保持不变,则分组错误率为^[10]

$$p = 1 - p[\bar{A}]p[\bar{B}]p[\bar{C}]p[\bar{D}]p[\bar{E}] \quad (2)$$

式中 A, B, C, D, E 分别表示引起分组传输错误的 5 种事件:发送分组的接入码同步错误;发送分组的分组头经 1/3 比例前向纠错(FEC)检测出错;由于循环冗余校验(CRC)校验错误,发送分组载荷出错;返回分组的接入码同步错误;返回分组的分组头错误。 $p[\bar{A}], p[\bar{B}], p[\bar{C}], p[\bar{D}]$ 和 $p[\bar{E}]$ 表示这 5 种出错事件不发生的概率,相应公式见文献[10]。

3 基于信道转换的同频干扰抑制方法

蓝牙系统有两种链路:异步无连接链路(ACL)和同步面向连接链路(SCO)^[11],本文讨论 ACL 链路。在蓝牙微微网的主设备向从设备传输 ACL 数据分

组时,从设备会向主设备发送返回分组。返回分组包含接入码和分组头,没有有效载荷。返回分组分为两种类型:ACK(ACKnowledgement)和 NAK(Negative Acknowledgement)。当从设备成功接收来自主设备的数据分组时,向主设备发送 ACK;当从设备对来自主设备的数据分组接收失败时,向主设备发送 NAK。如果主设备接收到来自从设备的 NAK 或者由于干扰等原因致使返回分组接收失败,那么主设备就要重传前一发送时隙发送的数据分组,并且重传时所用的信道与主设备前一发送时隙使用的信道相同。

由于 ACL 数据分组分为 3 种时隙类型,因此存在这样的情况:当参考网重传时,与其同频的干扰网在同频干扰发生时的数据分组还未传输完毕,以至于两个网仍然同频,存在相互干扰的可能,使数据分组无法正确传输,从而造成参考网吞吐量的再次下降。针对此问题,本文采用信道转换的方法来减小重传时参考网与干扰网之间的同频概率,即当接收到 NAK 或者未接收到返回分组时,主设备会在跳频序列中选择新的跳频频点作为重传的信道。

本文所分析的网络场景为室内环境,室内信号的衰减相对较小,因此可以用最小频移键控(MSK)调制方式代替 GFSK 对蓝牙信号进行调制。MSK 调制方式的比特错误率为^[12]

$$p(\gamma) \approx \operatorname{erfc}(\sqrt{0.85\gamma})/2 \quad (3)$$

下面对采用基于信道转换的同频干扰抑制方法前后,微微网间的同频概率及微微网的网络性能进行分析。

4 采用干扰抑制方法微微网之间的同频概率及网络性能分析

在分析蓝牙微微网之间的同频概率之前,首先做如下假设:

(1)假设有 N 个微微网同时存在,设参考网为 X ,干扰网为 Y , $N-1$ 个潜在干扰网随机分布在以参考网为圆心,以 10 m 为半径的圆形区域内。

(2)将发送分组、返回分组及空包(即没有数据发送的时隙)的每个时隙用 13 个分隔符($B_1 \sim B_{13}$)隔开,如图 1 所示。

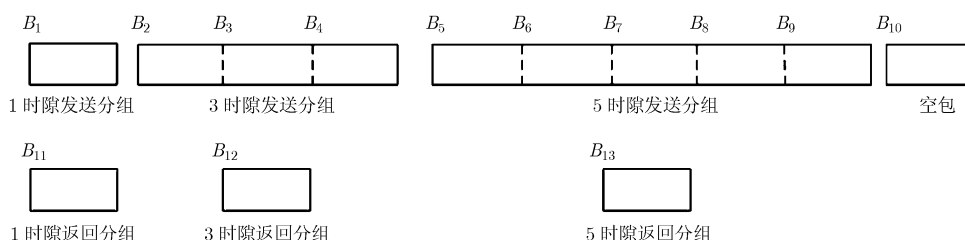


图1 时隙分隔符

(3) $\lambda_1, \lambda_3, \lambda_5$ 分别表示传输数据时 1, 3, 5 时隙发送分组每个时隙出现的概率, 由于一个发送分组后面必会跟随一个返回分组, 所以 1, 3, 5 返回分组每个时隙出现的概率分别与 1, 3, 5 时隙发送分组每个时隙出现的概率相对应。 λ_0 表示空包出现的概率, 并且 $2\lambda_1 + 4\lambda_3 + 6\lambda_5 + \lambda_0 = 1$ 。假设 $\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_5 + \lambda_0 = \lambda$ 。各个时隙出现的概率如下:

$$\lambda(B_j) = \begin{cases} \lambda_0, & j = 10; \\ \lambda_3, & j = 2, 3, 4, 12 \\ \lambda_1, & j = 1, 11; \\ \lambda_5, & j = 5, \dots, 9, 13 \end{cases} \quad (4)$$

(4) ACL 数据分组的接入码和分组头统称为包头, 假设包头、有效载荷及跳频保护间隔占整个时隙的比例分别为 h, l, d 。

4.1 干扰抑制前两个微微网之间的同频概率分析

4.1.1 X 发送分组与 Y 同频的概率 为了更加完善, 在分析同频概率时考虑了返回分组和跳频保护间隔。由于返回分组不包含有效载荷, 因此它的数据占整个时隙的比例相对发送分组较小, 而跳频保护间隔部分没有有效数据进行传输, 因此在分析微微网之间的同频概率时应分多种情况进行。当 B_j 前面为 Y 发送分组的最后一个时隙, 即 $j = 11, 12$ 或 13 时, B_j 前面时隙的尾部为跳频保护间隔, 该部分不包含任何有效数据, 因此将 X 发送分组第 1 时隙分成 $d, 1-d$ 两段, 只有 B_j 在 $1-d$ 段内时, Y 发送分组的最后一个时隙的有效数据才会与 X 发送分组重合; 当 X 发送分组为 1 时隙分组时, X 发送分组的尾部为跳频保护间隔, 没有有效数据, B_j 在该部分时, 不论 j 为何值, B_j 都不会与 X 同频, 因此将 X 发送分组的 $1-d$ 段继续细分为 $1-2d, d$ 两段; 当 B_j 前面为 Y 的返回分组时, 返回分组只包含包头, 因此只有 B_j 在 X 发送分组尾部与包头长度相同的段内时, Y 的返回分组的有效数据才会与 X 发送分组重合, 将 X 发送分组尾部的 d 段继续细分为 $d-h, h$ 两段。X 发送分组的分段图如图 2 所示。

结合图 2, 下面将分别分析 X 发送分组的第 1 个时隙及 X 发送分组第 1 个时隙后面的时隙与 Y 不同频的概率 $f_{tik}(j), l_{tik}(j)$, 其中, $i=1, 3, 5$ 分别表示参考网 X 发送的 3 种类型数据分组: 1 时隙分组、3 时隙分组、5 时隙分组; $k=1, 2, 3, 4$ 分别表示图 2 中的第 1, 2, 3, 4 段。

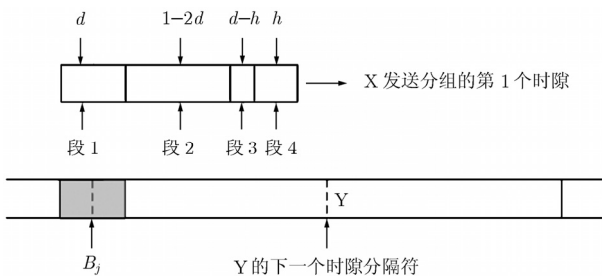


图 2 发送分组的分段图

那么得 X 发送分组与 Y 不同频的概率为 $\bar{p}_t(i)$, X 发送分组与 Y 同频的概率为 $p_t(i)$, 如式(5)所示。

$$\left. \begin{aligned} \bar{p}_t(i) &= d \sum_{j=1}^{13} \lambda(B_j) f_{ti1}(j) l_{ti1}(j) + (1-2d) \\ &\quad \cdot \sum_{j=1}^{13} \lambda(B_j) f_{ti2}(j) l_{ti2}(j) + (d-h) \\ &\quad \cdot \sum_{j=1}^{13} \lambda(B_j) f_{ti3}(j) l_{ti3}(j) \\ &\quad + h \sum_{j=1}^{13} \lambda(B_j) f_{ti4}(j) l_{ti4}(j) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$p_t(i) = 1 - \bar{p}_t(i)$$

(1) X 发送分组第 1 时隙与 Y 不同频的概率 结合图 2, 分析 Y 的某个分隔符 B_j 分别在 4 个段内时, X 发送分组的第 1 时隙与 Y 不同频的概率 $f_{tik}(j)$ 。当 B_j 在 X 发送分组的第 1 段时 ($k=1$), 若 $j=3, 4$ (或者 $6 \sim 9$), 此时 X 发送分组的第 1 时隙在 B_j 处与 B_j 前面经历的 Y 分组是同一分组: 3 时隙数据分组 (5 时隙数据分组), 则有 $f_{ti1}(j) = P_0$, P_0 代表 $78/79$; 若 $j=10$, Y 在 B_j 处与 B_j 前面均没有数据与 X 重合, 则有 $f_{ti1}(10) = 1$; 当 j 为其他值时, Y 在 B_j 前面没有数据与 X 发送分组的第 1 时隙重合, 则有 $f_{ti1}(j) = P_0$ 。 B_j 在 X 发送分组的第 2 段时, $f_{tik}(j)$ 的分析过程与前面类似, 也需要考虑保护间隔的长度、Y 返回分组包头的长度。综上, 当 B_j 在段 k 内时, $f_{tik}(j)$ 可以表示如下:

$$f_{ti1}(j) = \begin{cases} 1, & j = 10 \\ P_0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

$$f_{ti33}(j) = f_{ti53}(j) = f_{ti2}(j) = \begin{cases} 1, & j = 10 \\ P_0, & j = 1, \dots, 9 \\ P_0^2, & j = 11, 12, 13 \end{cases} \quad (7)$$

$$f_{ti13}(j) = \begin{cases} 1, & j = 1, 2, 5, 10 \\ P_0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

$$f_{ti14}(j) = \begin{cases} \frac{\lambda_0}{\lambda} + \frac{\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_5}{\lambda} P_0, & j = 1, 2, 5, 10 \\ P_0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

$$f_{i34} = f_{i54} = \begin{cases} P_0, & j = 3, 4, 6, 7, 8, 9 \\ P_0^2, & j = 11, 12, 13 \\ \frac{\lambda_0}{\lambda} + \frac{\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_5}{\lambda} P_0, & j = 10 \\ \frac{\lambda_0}{\lambda} P_0 + \frac{\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_5}{\lambda} P_0^2, & j = 1, 2, 5 \end{cases} \quad (10)$$

(2) X 发送分组第 1 时隙后面的时隙与 Y 不同频

的概率 当 X 为 1 时隙发送分组时, X 当前所传的数据分组只经历了 Y 当前所传的数据分组, 因此 $l_{t1k}(j)=1$; 当 X 为 3 时隙发送分组时, X 当前所传的数据分组至多要经历 Y 的 3 个数据分组, $l_{t3k}(j)$ 如式(11)、式(12)所示; 当 X 为 5 时隙发送分组时, X 当前所传的数据分组至多要经历 Y 的 5 个数据分组, 5 时隙分组与 1, 3 时隙分组分析过程相同, 在此不列出。

$$l_{t31}(j) = l_{t32}(j) = \begin{cases} 1, & j = 2, 5, 6, 7 \\ p_0, & j = 3, 8 \\ \frac{\lambda_0}{\lambda} p_0 + \frac{\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_5}{\lambda} p_0^2, & j = 1, 4, 9 \\ \frac{\lambda_0}{\lambda} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} + \frac{\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_5}{\lambda} p_0 \right) + \frac{\lambda_1}{\lambda} p_0^2 \\ \quad + \frac{\lambda_3 + \lambda_5}{\lambda} p_0, & j = 10, \dots, 13 \end{cases} \quad (11)$$

$$l_{t33}(j) = l_{t34}(j) = \begin{cases} 1, & j = 2, 3, 5, \dots, 8 \\ \frac{\lambda_0}{\lambda} + \frac{\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_5}{\lambda} p_0, & j = 10, \dots, 13 \\ p_0, & j = 1, 4, 9 \end{cases} \quad (12)$$

4.1.2 X 返回分组与 Y 同频的概率 在分析 X 返回分组与 Y 之间的同频概率时, 同样也需将 X 返回分组进行分段。X 返回分组的分段图如图 3 所示。由于返回分组只有一个时隙, 所以只需分别分析当 Y 的某个分隔符 B_j 通过 X 返回分组的 4 段时, X 返回分组与 Y 不同频的概率 $f_{rik}(j)$ 。计算 $f_{rik}(j)$ 的方法与计算 $f_{tik}(j)$ 的方法相同, 此处不再赘述。

那么得 X 返回分组与 Y 不同频的概率 $\bar{p}_r(i)$ 及与 Y 同频的概率 $p_r(i)$ 为

$$\left. \begin{aligned} \bar{p}_r(i) &= h \sum_{j=1}^{13} \lambda(B_j) f_{r1}(j) + (d-h) \\ &\quad \cdot \sum_{j=1}^{13} \lambda(B_j) f_{r2}(j) + (1-d-h) \\ &\quad \cdot \sum_{j=1}^{13} \lambda(B_j) f_{r3}(j) \\ &\quad + h \sum_{j=1}^{13} \lambda(B_j) f_{r4}(j) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

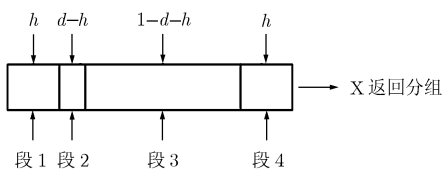


图3 返回分组分段图

4.2 干扰抑制后两个微微网之间的同频概率分析

4.2.1 X 重传分组与 Y 同频的概率 将参考网 X 重传分组的第 1 个时隙分成图 2 所示的 4 段, 分析潜在在干扰网 Y 的某个分隔符 B_j 分别在 X 的 4 段内时, X 重传分组与 Y 不同频的概率 $F_{tik}(j)$ 。由于重传是由同频干扰造成的, 且蓝牙跳频序列中每个频点的使用率几乎相同, 不可能存在同一频点在很短时间间隔内出现多次的情况, 所以在计算 X 与 Y 不同频的概率时, P_0 表示 77/78。与信道转换前相比, X 与 Y 同频的情况明显降低, 例如, 当 X 传输 1 时隙分组, 且 B_j 在 X 的第 1 段内时, 若 $j = 4, 7, \dots, 9$, 则与 X 前一次传输时产生同频干扰的 Y 所传输的数据分组还未传完, 此时 Y 使用的频率为 X 信道转换前所使用的频率, 因此 $F_{t11}(j)=1$ 。 $F_{tik}(j)$ 具体分析过程与未加干扰抑制方法时对 $f_{tik}(j)$ 及 $F_{t11}(j)$ 的分析过程相似, 此处不再赘述。由此得出 X 重传分组与 Y 不同频的概率 $F_{tik}(j)$, 由于公式过多, 且与 $f_{tik}(j)$ 公式形式相似, 因此公式不列出。

设 X 重传分组第 1 时隙后面的时隙与 Y 不同频的概率为 $L_{tik}(j)$, 则有 $L_{tik}(j)=l_{tik}(j)$ 。将式(5)中的 $f_{tik}(j)$ 和 $l_{tik}(j)$ 分别用 $F_{tik}(j)$ 和 $L_{tik}(j)$ 代替, 即可得 X 重传分组与 Y 不同频的概率 $\bar{p}'_r(i)$ 及与 Y 同频的概率 $p'_r(i)$ 。

4.2.2 X 返回分组与 Y 同频的概率 将 X 的返回分组分成如图 3 所示的 4 段, 由此可分析 Y 的某个分隔符 B_j 在 X 返回分组的 4 个段内时, X 各段与 Y 不同频的概率 $F_{rik}(j)$, 其分析过程与 4.2.1 节相似, 因此不赘述。由此将式(13)中的 $f_{rik}(j)$ 改为 $F_{rik}(j)$ 即可得 X 的返回分组与 Y 不同频的概率 $\bar{p}'_r(i)$ 及与 Y 同频的概率 $p'_r(i)$ 。

以上为两个微微网共存的情况。当微微网数量为 N 时, 干扰抑制前参考网发送分组与 $N-1$ 个潜在在干扰网同频的概率如式(14)所示。

$$p_{tn}(i) = \sum_{k=1}^{N-1} \binom{N-1}{k} p_t(i)^k \bar{p}_t(i)^{(N-1-k)} \quad (14)$$

将式(14)中的 $p_t(i)$ 替换为 $p_r(i)$, $\bar{p}'_t(i)$ 和 $p'_t(i)$ 即可得到干扰抑制前参考网返回分组、干扰抑制后参考网发送分组及返回分组与 $N-1$ 个潜在在干扰网同频的概率 $p_{rn}(i)$, $p'_{rn}(i)$ 和 $p'_{rn}(i)$ 。

4.3 网络性能分析

4.3.1 载干比 蓝牙协议规定蓝牙微微网之间同频时载干比门限值为 11 dB, 当载干比低于 11 dB 时, 网络性能就会受到同频干扰的影响。设 P_T 为蓝牙发送信号功率, P_R 为参考网接收信号功率:

$$P_R = 10^{(P_T - L_{\text{path}}(D))/10} \quad (15)$$

式中 L_{path} 为蓝牙室内环境的路径传输损耗，由文献 [13] 可以求得； D 为参考网的主设备与从设备之间的距离。由于参考网在传输发送分组与返回分组时微微网之间的同频概率不同，因此参考网在传输发送分组与返回分组时干扰信号功率也有所不同。某一时刻参考网在传输某种时隙发送分组的干扰信号功率为 $P_{It}(i)$ ，用 $p_{rn}(i)$ 代替 $p_{tn}(i)$ 即可得传输返回分组时的干扰信号功率 $P_{Ir}(i)$ 。

$$P_{It}(i) = \sum_{n=1}^{N-1} p_{tn}(i) \sum_{j=1}^n 10^{(P_T - L_{\text{path}}(r_j))/10} \quad (16)$$

式中 $i=1,3,5$ 代表 3 种时隙分组， r_j 为第 j 个干扰网发射设备和参考网接收设备之间的距离。综上可得参考网接收端接收的干扰信号功率 P_I 和载干比 C/I 。

$$P_I = \lambda_1 (P_{It}(1) + P_{Ir}(1)) + \lambda_3 (3P_{It}(3) + P_{Ir}(3)) + \lambda_5 (5P_{It}(5) + P_{Ir}(5)) \quad (17)$$

$$C/I = P_R/P_I \quad (18)$$

将式 $p'_{tn}(i)$ ， $p'_{rn}(i)$ 代入式(16)~式(18)可得干扰抑制后参考网接收端接收的干扰信号功率 P'_I 和载干比 C/I' 。以上功率的单位均为 mW。

4.3.2 分组错误率分析 设蓝牙 DM 分组和 DH 分组的前向非对称速率及后向非对称速率为 $R_t(i)$ 和 $R_r(i)$ ， $i=1,3,5$ 分别代表 1, 3, 5 时隙分组。当传输发送分组时，参考网接收到的参考信号 1 bit 的平均能量为 $E_{bt}(i) = P_R/R_t(i)$ ，干扰信号 1 bit 的平均能量为 $E_{Ibt}(i) = P_{It}(i)/\bar{R}(i)$ ，则比特信噪比为 $\gamma_{ti} = E_{bt}(i)/(E_{Ibt}(i) + N_0)$ ；当传输返回分组时，参考网接收参考信号 1 bit 的平均能量为 $E_{br}(i) = P_R/R_r(i)$ ，干扰信号 1 bit 的平均能量为 $E_{Ibr}(i) = P_{Ir}(i)/\bar{R}(i)$ ，比特信噪比为 $\gamma_{ri} = E_{br}(i)/(E_{Ibr}(i) + N_0)$ 。 N_0 为噪声的功率谱密度， $\bar{R}(i)$ 为非对称平均速率，如式(19)所示。

$$\bar{R}(i) = [\lambda_1 (R_t(1) + R_r(1)) + \lambda_3 (3R_t(3) + R_r(3)) + \lambda_5 (5R_t(5) + R_r(5))]/(1 - \lambda_0) \quad (19)$$

将 γ_{fi} ， γ_{ri} 代入式(1)，式(2)即可得到干扰抑制前 DM 及 DH 类型分组的分组错误率 p_i 及传输成功概率 p_{ci} 。相应可得到干扰抑制后 DM 及 DH 类型分组的分组错误率 p'_i 及传输成功概率 p'_{ci} 。

4.3.3 网络吞吐量分析 根据分组错误率可进一步得参考网的吞吐量。参考网的吞吐量是参考网分别传输 1, 3, 5 时隙分组时的吞吐量之和，干扰抑制前参考网吞吐量如式(20)所示。式中 N_C 为重传次数， N_{Cmax} 为最大重传次数， R_1, R_3, R_5 分别为 1, 3, 5 时隙分组的用户净荷量。对于 DH 分组： $R_1=216$ ， $R_3=1464$ ， $R_5=2712$ ；对于 DM 分组： $R_1=136$ ，

$R_3=968$ ， $R_5=1792$ 。

$$T_R = \sum_{N_C=1}^{N_{\text{Cmax}}} \frac{2\lambda_1 p_c(1) p^{N_C-1}(1) R_1}{625 \times 10^{-6} \times 2N_C} + \sum_{N_C=1}^{N_{\text{Cmax}}} \frac{4\lambda_3 p_c(3) p^{N_C-1}(3) R_3}{625 \times 10^{-6} \times 4N_C} + \sum_{N_C=1}^{N_{\text{Cmax}}} \frac{6\lambda_5 p_c(5) p^{N_C-1}(5) R_5}{625 \times 10^{-6} \times 6N_C} \quad (\text{bit/s}) \quad (20)$$

采用基于信道转换的同频干扰抑制方法后，由于参考网与潜在干扰网的同频概率在第 1 次传输与第 2 次重传时不同，因此参考网的吞吐量计算与加入干扰抑制方法前有所不同。其计算公式为

$$T'_R = \frac{\lambda_1 p_c(1) R_1}{625 \times 10^{-6}} + \frac{\lambda_3 p_c(3) R_3}{625 \times 10^{-6}} + \frac{\lambda_5 p_c(5) R_5}{625 \times 10^{-6}} + \sum_{N_C=1}^{N_{\text{Cmax}}-1} \frac{\lambda_1 p'_c(1) p(1) (p'(1))^{N_C-1} R_1}{625 \times 10^{-6} \times (N_C + 1)} + \sum_{N_C=1}^{N_{\text{Cmax}}-1} \frac{\lambda_3 p'_c(3) p(3) (p'(3))^{N_C-1} R_3}{625 \times 10^{-6} \times (N_C + 1)} + \sum_{N_C=1}^{N_{\text{Cmax}}-1} \frac{\lambda_5 p'_c(5) p(5) (p'(5))^{N_C-1} R_5}{625 \times 10^{-6} \times (N_C + 1)} \quad (\text{bit/s}) \quad (21)$$

5 网络性能仿真与分析

在 Matlab 环境，对采用干扰抑制方法前后，载干比、分组错误率和参考网吞吐量做了大量仿真实验。仿真中网络数量 N 取 2~100，步长为 1；参考网主从设备之间的距离 D 为 0.1~10 m，步长为 0.1 m；潜在干扰网在 10 m 的圆形区域内随机地分布，即参考网接收设备与干扰网发射设备之间的距离取随机值。

5.1 载干比仿真

图 4 为微微网载干比的仿真，图 4(a)，图 4(b) 分别对干扰抑制前、后进行仿真。由图 4 可见，随着 D 值及 N 值的增大，载干比逐渐减小。图中灰色平面的载干比值为 11 dB。

由图 4(a) 可见，载干比最大值为 46.568 dB、最小值为 -9.907 dB。当 D 大于 6 m 时，参考网的载干比均在 11 dB 以下，此时无论共存微微网数量多少，微微网之间只要同频就会产生干扰。微微网之间相互干扰的区域非常大。由图 4(b) 可见，载干比最大值和最小值比干扰抑制前分别提高了 7.501 dB, 2.242 dB，并且微微网之间相互干扰的区域明显减少。当 D 小于 1.2 m 时，参考网的载干比均在 11 dB 以上；在 $N=2$ 或 3 时，无论 D 在 10 m 以内取何值，参考网的载干比均在 11 dB 以上，同时在 $3 < N \leq 10$ 时，参考网不受同频干扰的主从设备之间最大距离与未加干扰抑制方法前有明显增加。

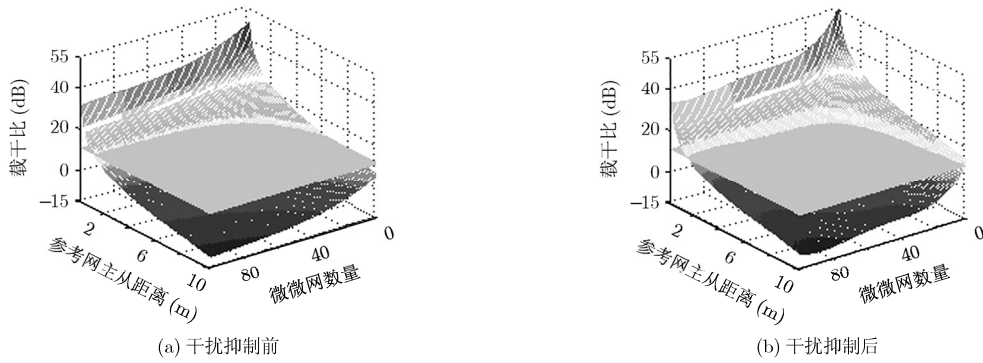


图 4 蓝牙微微网的载干比

由于干扰抑制前, 当 D 大于 6 m 时, 载干比均小于 11 dB。为了更好地反映蓝牙微微网受同频干扰影响的程度以及信道转换的干扰抑制方法的效果, 下面在对分组错误率及参考网吞吐量仿真时取主从设备之间的距离 $D = 6$ m。

5.2 分组传输错误率仿真与分析

图 5 为采用干扰抑制方法前后分组错误率随微微网数量变化的曲线。由图 5 可见: 相同时隙的 DH 类型分组的分组错误率高于 DM 类型分组; 图 5(a) 是对干扰抑制前进行的仿真, 在 N 小于 20 时, 3, 5 时隙分组的分组错误率都已上升为 1; 图 5(b) 是对干扰抑制后进行的仿真, 与图 5(a) 相比, 干扰抑制后 3 时隙与 5 时隙分组错误率得到了很好的抑制; 1

时隙分组的分组错误率相对 3, 5 时隙分组较小, 这是因为 1 时隙分组较短, 与干扰网数据分组同频的概率较小。与干扰抑制前相比, 蓝牙微微网 1 时隙分组传输成功率明显增加。

5.3 参考网吞吐量仿真与分析

图 6 和图 7 分别为微微网传输 DM 类型分组和 DH 类型分组时, 参考网吞吐量随微微网数量变化时的仿真, 两组图都对 1, 3, 5 时隙分组按各种不同比例混合传输的情况进行了大量仿真。两组图中, 图 6(a), 图 7(a) 和图 6(b), 图 7(b) 分别对干扰抑制前、后进行了仿真。

由图 6(a) 可见, 对于干扰抑制前的 DM 类型分组, 当 $2 \leq N \leq 25$ 时, “0%DM1, 20%DM3, 50%DM5”

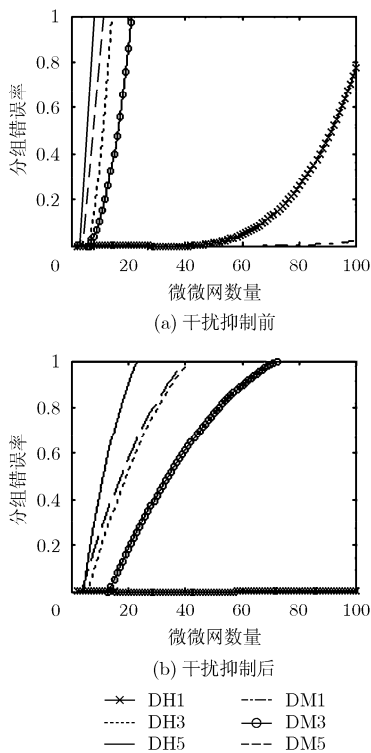


图 5 通信量 70% 时的分组错误率

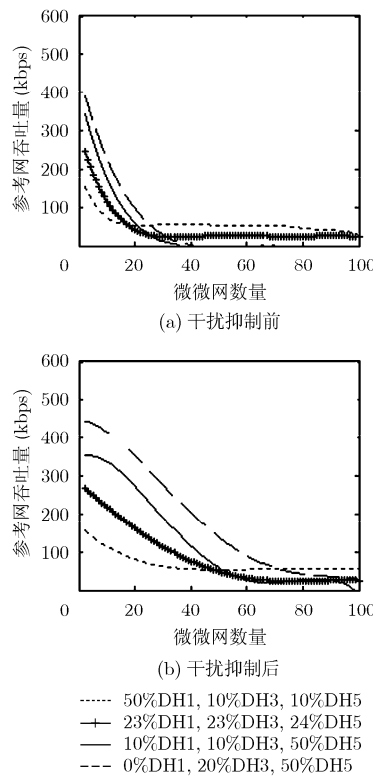


图 6 参考网传输 DM 分组时的吞吐量

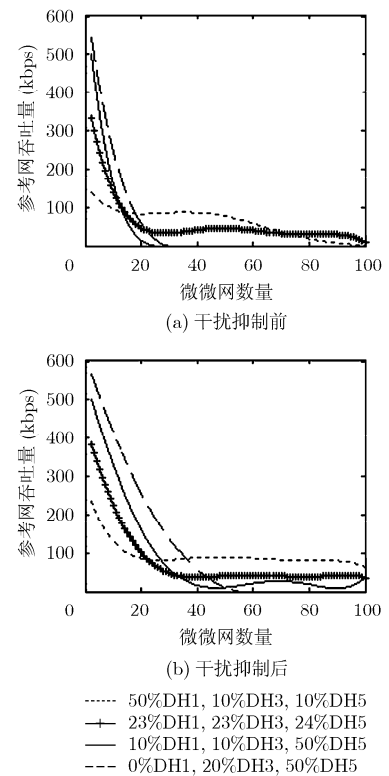


图 7 参考网传输 DH 分组时的吞吐量

混合传输的网络吞吐量最大；而 $N > 25$ 时，“50%DM1, 10%DM3, 10%DM5”混合传输的网络吞吐量最大。由图 6(b)可见，对于干扰抑制后的 DM 类型分组，“0%DM1, 20%DM3, 50%DM5”混合传输的网络吞吐量最大值的区间扩大了，从干扰抑制前的 $2 \leq N \leq 25$ 扩大到 $2 \leq N \leq 73$ ，并且当 $N \leq 60$ 时，干扰抑制后 DM 分组整体的网络吞吐量比干扰抑制前有明显提高。这主要是因为干扰抑制后 DM 各种时隙分组的传输错误率均有所下降，尤其是 3, 5 时隙，它们所含的有效载荷数较大，所以在 $N \leq 60$ 范围内吞吐量提高非常明显。DH 类型分组与 DM 类型分组情况相似，在此不再赘述。

由图 6 和图 7 可得干扰抑制前后参考网吞吐量的最大值，如图 8 所示。在干扰抑制前，当网络数量大于 20 时，参考网在各种比例混合的传输方式下的吞吐量都在 100 kbit/s 以下，可知参考网吞吐量受同频干扰的影响很严重。干扰抑制后，参考网吞吐量得到了很大程度的改善，尤其在 $14 \leq N \leq 57$ 区间内，微微网吞吐量最大可增加 260 kbps。

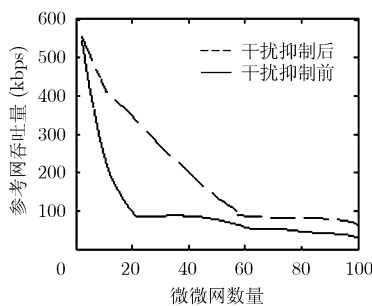


图 8 干扰抑制前后参考网吞吐量最大值对比

6 结束语

本文针对多个蓝牙微微网之间的同频干扰问题，提出了基于信道转换的同频干扰抑制方法。该方法在蓝牙微微网重传时进行信道转换，并采用 MSK 调制方式代替 GFSK 调制方式；为了使对网络性能的分析更加完善，该方法根据载干比值判断微微网是否受到同频干扰，并且分析了多个蓝牙微微网之间的同频概率。通过大量仿真实验证明，本文提出的基于信道转换的同频干扰抑制方法能够有效地减小分组错误率、提高参考网的载干比和吞吐量，使主从设备间不受同频干扰的最大传输距离有所增加，很大程度上减少了同频干扰的范围。

参考文献

[1] Haataja K and Toivanen P. Two practical m-in-the-middle attacks on bluetooth secure simple pand countermeasures[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(1): 384-392.

[2] Lee U, Jung S, Cho Dae-ki, et al. P2P content distribution to mobile bluetooth users[J]. *IEEE Transactions on Vehicular*

Technology, 2010, 59(1): 356-367.

[3] Zurbes S, Stahl W, Matheus K, et al. Radio network performance of Bluetooth[C]. *IEEE International Conference on Communications*, New Orleans, LA, USA, June 18-22, 2000, 3: 1563-1567.

[4] Lin Ting-yu and Tseng Yu-chee. Collision analysis for a multi-Bluetooth picocells environment[J]. *IEEE Communications Letters*, 2003, 7(10): 475-477.

[5] Lin Ting-yu, Liu Yen-ku, and Tseng Yu-chee. An improved packet collision analysis for multi-bluetooth piconets considering frequency-hopping guard time effect[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, 22(10): 2087-2094.

[6] Kim Seung-yeon, Kim Se-jin, Lee Hyong-woo, et al. Packet interference and aggregated throughput of bluetooth piconets using an adaptive frequency hopping in rician fading channels[C]. *2008 International Conference on Information Networking*, Busan, Korea, Jan. 23-25, 2008: 1-5.

[7] Ashraf I, Gkelias A, Dohler M, et al. Time-synchronised multi-piconet Bluetooth environments[J]. *IEE Proceedings Communications*, 2006, 153(3): 445-452.

[8] Li Jing-li and Liu Xiang-qian. A collision resolution technique for robust coexistence of multiple bluetooth piconets[C]. *2006 IEEE 64th Vehicular Technology Conference*, Montreal, Que, Canada, Sept. 25-28, 2006: 1-5.

[9] Li Jing-li, Liu Xiang-qian, and Swami A. Collision analysis for coexistence of multiple bluetooth piconets and WLAN with dual channel transmission[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2009, 57(4): 1129-1139.

[10] 杨帆, 王珂, 钱志鸿. 蓝牙分组传输性能分析与自适应分组选择策略[J]. *通信学报*, 2005, 26(9): 97-102, 110.

Yang Fan, Wang Ke, and Qian Zhi-hong. Performance Analysis of Bluetooth packet transmission and adaptive packet selection strategy[J]. *Journal on Communications*, 2005, 26(9): 97-102, 110.

[11] 王雪, 钱志鸿, 李冰, 等. 蓝牙自适应分组选择策略与选择重传算法研究[J]. *通信学报*, 2011, 32(1): 151-158.

Wang Xue, Qian Zhi-hong, Li Bing, et al. Adaptive packet selection scheme and selective retransmission algorithm for Bluetooth[J]. *Journal on Communications*, 2011, 32(1): 151-158.

[12] 郭梯云, 等. 数字移动通信(修订本)[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2000.

[13] Lee Seung-hwang and Lee Yong-hwang. Adaptive frequency hopping and power control based on spectrum characteristic of error sources in Bluetooth systems[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2010, 36(2): 341-351.

钱志鸿：男，1957年生，教授，博士生导师，主要研究方向为基于蓝牙、RFID等短距离无线通信技术的无线局域网与无线传感器网络。

郭雨齐：女，1979年生，博士生，研究方向为无线网络中的信息传输及处理。

侯金凤：女，1984年生，硕士生，研究方向为蓝牙技术理论研究与应用。

王义君：男，1984年生，博士生，研究方向为无线传感器网络及物联网。