

# 蓝牙跳频序列的性能分析

蔡金元<sup>1</sup>, 梅文华<sup>2</sup>, 杜兴民<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 北京航空工程技术研究中心, 北京 100076)

**摘要:**分析了蓝牙跳频序列的汉明相关特性、序列平衡特性、组网特性和系统容量,指出某些蓝牙跳频序列在时钟同步时会出现严重的碰撞,并提出了相应的解决办法,其中一个较好的解决办法是同一区域任意2台蓝牙设备的地址  $A_{27-0}$  在3个部分  $A_{27-19}$ 、 $A_{18-14,12,10,8,6,4,2,0}$  和  $A_{13,11,9,7,5,3,1}$  中都有不同位,且不同位分布尽可能分散,不同位数越多越好。

**关键词:**跳频通信;蓝牙;跳频序列;汉明相关

**中图分类号:** TN918.1    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1009-3516(2004)02-0059-04

## 1 蓝牙跳频序列

蓝牙基带标准定义了10种类型的跳频序列,其中79跳系统与23跳系统各有如下5种类型:呼叫跳频序列、呼叫响应序列、查询跳频序列、查询响应序列、信道跳频序列。蓝牙跳频序列由本地时钟(实时TOD信息)和蓝牙设备地址通过首次相加、异或运算、换位操作、二次相加等处理方法产生。生成的跳频序列对寄存器组寻址,从寄存器中取出跳频频隙,得到跳频图案<sup>[1]</sup>。下面以79跳系统信道跳频序列为例进行分析,其跳频选择内核原理见图1。

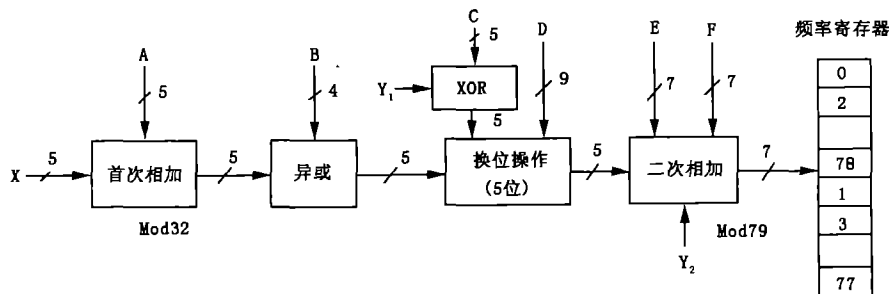


图1 跳频选择内核框图

跳频系统选频内核控制字由全部控制信号组成,包括  $X, Y_1, Y_2, A \sim F$ , 见表1, 其中,  $CLK_{27-0}$  为当前微网主钟,  $A_{27-0}$  为蓝牙设备地址码。换位操作包括7步蝶形操作, 见表2。该操作涉及从5位输入信号到5位输出信号间交换位置, 交换方式由控制信号P控制, 其中,  $P_{0-8}$  对应  $D_{0-8}$ ,  $P_{i+9}$  对应  $C_i \oplus Y_1, i=0 \sim 4$ 。在连接状态,  $CLK_{6-2}$  (输入信号X) 为32序列相位信号,  $CLK_1$  (输入信号  $Y_1, Y_2$ ) 反映接收/发送情况 ( $CLK_1=0$ , 主单元发送;  $CLK_1=1$ , 主单元接收)。地址输入信号确定段内频点位置, 最终映射的频率值由寄存器内容决定。

收稿日期: 2003-10-20

基金项目: “十五”军事通信技术预研项目(41001020303)

作者简介: 蔡金元(1965-), 男, 湖北孝感人, 硕士, 主要研究方向为扩展频谱通信;

梅文华(1965-), 男, 湖南涟源人, 高级工程师, 工学博士, 主要从事扩展频谱通信、编码信号设计;

杜兴民(1941-), 男, 安徽涡阳人, 教授, 主要从事通信保密与抗干扰技术研究。

表 1 79 跳系统控制量

控制信号	连接状态
X	$CLK_{6-2}$
$Y_1$	$CLK_1$
$Y_2$	$32 \times CLK_1$
A	$A_{27-23} \oplus CLK_{25-21}$
B	$A_{22-19}$
C	$A_{8,6,4,2,0} \oplus CLK_{20-16}$
D	$A_{18-10} \oplus CLK_{15-7}$
E	$A_{13,11,9,7,5,3,1}$
F	$16 \times CLK_{27-7} \bmod 79$

表 2 79 跳系统蝶形控制

步骤	控制信号	蝶形操作
1	$P_{13}$	$\{Z_1, Z_2\}$
	$P_{12}$	$\{Z_0, Z_3\}$
2	$P_{11}$	$\{Z_1, Z_3\}$
	$P_{10}$	$\{Z_2, Z_4\}$
3	$P_9$	$\{Z_0, Z_3\}$
	$P_8$	$\{Z_1, Z_4\}$
4	$P_7$	$\{Z_3, Z_4\}$
	$P_6$	$\{Z_0, Z_2\}$
5	$P_5$	$\{Z_1, Z_3\}$
	$P_4$	$\{Z_0, Z_4\}$
6	$P_3$	$\{Z_3, Z_4\}$
	$P_2$	$\{Z_1, Z_2\}$
7	$P_1$	$\{Z_2, Z_3\}$
	$P_0$	$\{Z_0, Z_1\}$

## 2 蓝牙跳频序列的性能分析

### 2.1 蓝牙跳频序列的平衡性

在连接状态中,79 跳系统选频机制输出构成伪随机序列。选频机制选择一个频点段,该段由张在 64 MHz 上的 32 个跳频点组成,并以随机顺序每次访问其中一个频点。然后,再选择一个不同的 32 频点段,每段内频点序列保证较长时间内不出现重复,连续两段之间频点差值为 16。整个跳频序列由序贯 32 频点段组成,每段所占频率范围超过 79 MHz 的 80%。所以,在较短时间间隔上,能得到希望的扩频效果。由上述选频原理可知,信道跳频序列具有较长周期(227),并且频点均匀分布在 79 MHz 范围内。序列的平衡性可通过计算机仿真来检验,图 2 是

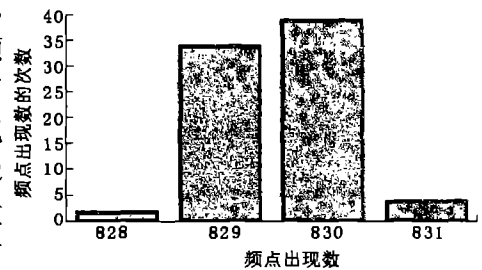


图 2 某信道路频序列频点数分布

截取某蓝牙跳频序列中长为 216 的一段对各频点出现次数的统计结果。统计结果显示:79 个频点中有 39 个频点出现 830 次,34 个频点出现 829 次,4 个频点出现 831 次,2 个频点出现 828 次。大量的计算机统计结果与上述分析一致。

### 2.2 蓝牙跳频序列的汉明相关性能

#### 2.2.1 平均汉明相关

蓝牙跳频序列中的频隙是均匀出现的,根据给定频隙数目和序列长度条件下汉明相关的下限理论<sup>[2-4]</sup>,任意蓝牙跳频序列  $S_u$  的异相自相关的平均值和任意两个蓝牙跳频序列  $S_u$  和  $S_v$  之间汉明相关的平均值将达到最小。它们的归一化值分别为

$$\overline{H}(S_u)/L = \frac{(L-b)(L+b-q)/L}{q(L-1)} = \frac{(2^{27}-46)(2^{27}+46-79)}{79 \times (2^{27}-1) \times 2^{27}} \approx \frac{1}{79} \approx 0.0127$$

$$\overline{M}(S_u, S_v)/L = \frac{1}{L} \left[ \sum_{i=0}^{q-1} (e_i^2 + d_i^2 + e_i d_i) - 2L \right] / (3L - 2) \approx [q \times 3 \times (\frac{L}{q})^2 - L] / [L(3L - 2)] \approx \frac{1}{q} \approx 0.0127$$

式中:  $q = 79, L = 2^{27}, b = L \bmod q = 46, e_i = d_i \approx L/q = 2^{27}/79$ 。

#### 2.2.2 汉明互相关

蓝牙跳频序列的汉明互相关性能,作者经过研究,主要有以下结论:

1)若 2 台蓝牙设备的地址码中与蝶型操作有关的位  $A_{18-14,12,10,8,6,4,2,0}$  (除  $A_{13,11}$  两位外)中有且仅有一位不同 ( $W = 1$ ),其他所有地址位都相同,则以这两台蓝牙设备为主单元组成的微网之间在主时钟同步时出现严重的频率碰撞,碰撞概率即两个微网对应跳频序列间汉明互相关值为 1/2。

2)若 2 台蓝牙设备的地址码中与蝶型操作有关的位  $A_{18-14,12,10,8,6,4,2,0}$  (除  $A_{13,11}$  两位外)中有两位不同 ( $W=2$ ),其他所有地址位都相同,则以这 2 台蓝牙设备为主单元组成的微网之间在主时钟同步时出现严重的频率碰撞,碰撞概率即两个微网对应跳频序列间汉明互相关值大于等于  $1/2^2$ 。其中又有三个特例:①不同位为  $A_6$  和  $A_0$  时,序列间汉明互相关值大于等于 0.625;②不同位为  $A_{12}$  和  $A_8$  时,序列间汉明互相关值大于等于 0.2734;③不同位为  $A_{15}$  和  $A_4$  时,序列间汉明互相关值大于等于 0.34375。

3)若 2 台蓝牙设备的地址码中与蝶型操作有关的位  $A_{18-14,12,10,8,6,4,2,0}$  (除  $A_{13,11}$  两位外)中有  $W$  位不同 ( $W \leq 12$ ),其他所有地址位都相同,则以这 2 台蓝牙设备为主单元组成的微网之间在主时钟同步时,频率碰撞概率至少为  $1/2^W$ 。

4)若 2 台蓝牙设备的地址码中与蝶型操作有关的位  $A_{18-10,8,6,4,2,0}$  中有且仅有一位  $A_n$  不同,同时与二次相加中的 E 有关的位  $A_{9,7,5,3,1}$  中某几个特殊位不同(究竟是哪几个不同位与  $A_n$  的位置有关),其他所有地址位都相同,则以这 2 台蓝牙设备为主单元组成的微网之间在主时钟同步时,发生频率碰撞的概率大于等于  $1/2^{m+2}$ ,其中  $m$  为 7 步蝶型操作中对应于  $A_n$  的换位操作( $A_n$  对应的 2 个操作位为  $Z_i$  和  $Z_j$ )后仍剩下的换位操作中涉及  $Z_i$  或  $Z_j$  的换位操作数。

以上 4 个结论都经过计算机仿真验证(由于序列周期极长,本文采用长度为  $2^{23}$  的截短序列进行仿真),但由于其理论推导过程比较复杂,此处篇幅有限,详细推导过程另文阐述。

5)由于序列的非线性,除了上述 4 种特殊情况,其他情况下任意 2 台蓝牙设备对应序列的互相关值很难从理论上进行推导,只能采用计算机仿真、统计、分析的方法获得。大量的仿真分析结果表明,其他情况下序列间汉明互相关最大峰值达到 0.1305,并且当 2 台蓝牙设备的地址在 3 个部分  $A_{27-19}$ 、 $A_{18-14,12,10,8,6,4,2,0}$  和  $A_{13,11,9,7,5,3,1}$  中都有不同位,且不同位分布越分散,不同位数越多,其互相关性能越好。并且当分散分布的不同位数大于一定数目时,2 个序列的互相关最大峰值将小于 0.035。图 3 为某 2 个蓝牙跳频序列间互相关特性仿真结果。

### 2.2.3 汉明异相自相关

经过计算机仿真和统计分析,任意蓝牙设备对应的信息跳频序列的异相自相关最大值为 0.1057。图 4 为某蓝牙跳频序列的异相自相关特性仿真结果,其自相关特性较差。

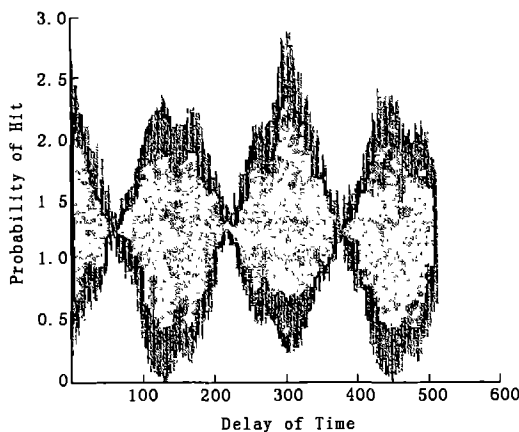


图 3 截短长度为  $2^{23}$  的某两个序列间汉明互相关仿真结果

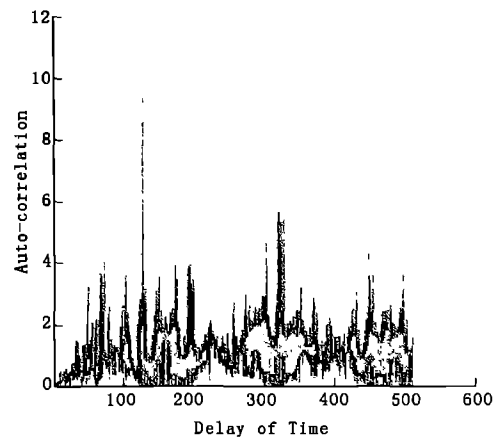


图 4 截短长度为  $2^{23}$  的某序列异相自相关仿真结果

## 2.3 蓝牙设备组网及系统容量

在  $u$  个微网同时跳频工作时,任意一个蓝牙设备将受到其他  $u-1$  个微网的重合干扰。根据多址组网时限定平均汉明相关条件下用户数量的界限理论<sup>[2]</sup>,同时工作的用户越多,某个用户受其他用户的干扰就越大,其关系表示如下:

$$u \leq 1 + \lg(1 - \bar{M}/L) / \lg(1 - 1/q)$$

式中: $q$  为频隙数目,  $\bar{M}(S_v: S_1, S_2, \dots, S_{v-1}, S_{v+1}, \dots, S_u)$  表示  $S_v$  受其他序列中任意若干次重合的平均数,在满足均匀性条件下(即每个序列中各频隙出现的次数相同),有

$$\bar{M}(S_v: S_1, S_2, \dots, S_{v-1}, S_{v+1}, \dots, S_u) = L[1 - (1 - 1/q)^{u-1}]$$

对于蓝牙 79 跳系统,  $q = 79$ 。同时工作的多个微网间互相干扰的情况, 经过计算机大量的仿真分析统计, 结果见表 3。仿真结果表明, 当微网数量超过 16 个, 就可能出现严重的相互间重合干扰。

表 3 微网数量与汉明互相关的关系

微网数量	2	4	8	16
理论平均值	0.0127	0.0375	0.0853	0.1739
仿真平均值	0.0125	0.0358	0.0874	0.1797
仿真最大值	0.0312	0.0791	0.1393	0.2267

### 3 结论与建议

基于计数式 TOD 的蓝牙跳频序列性能优越, 但是仍存在一些问题。本文在理论上分析了蓝牙跳频序列的性能, 指出某些蓝牙跳频序列在时钟同步时会出现严重的碰撞, 同时分析了蓝牙设备的组网性能及系统容量, 计算机仿真表明理论分析是正确的。为了解决某些蓝牙序列在主时钟同步时出现严重碰撞的问题, 提出几点建议:

1) 避免满足下述条件之一的 2 台设备分别作为两个微网的主设备同时出现在同一区域: ① 2 台设备地址中所有不同位都位于  $A_{18-14,12,10,8,6,4,2,0}$  中; ② 2 台设备地址中只有  $A_{10}$  位、 $A_1$  位不同, 其他所有地址位都相同。

2) 若满足上述条件的 2 台设备同时出现在同一区域, 则要求这两台设备的时钟不同步。

3) 较好的解决办法是同一区域任意 2 台蓝牙设备的地址在 3 个部分  $A_{27-19}$ ,  $A_{18-14,12,10,8,6,4,2,0}$  和  $A_{13,11,9,7,5,3,1}$  中都有不同位, 且不同位分布尽可能分散, 不同位数越多越好。

#### 参考文献:

- [1] 朱刚, 谈振辉, 周贤伟. 蓝牙技术原理与协议[M]. 北京: 北方交通大学出版社, 2002.
- [2] 梅文华, 杨义先. 跳频通信地址编码理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- [3] 梅文华, 杨义先, 周炯荣. 跳频序列设计理论的研究进展[J]. 通信学报, 2003, 24(2): 92-101.
- [4] LEMPEL A, GREENBERGER H. Families of Sequences with Optimal Hamming Correlation Properties [J]. IEEE Trans., 1974, IT-20(1): 90-94.

(编辑: 姚树峰)

## Property Analysis of Bluetooth Frequency Hopping Sequence

CAI Jin-yuan<sup>1</sup>, MEI Wen-hua<sup>2</sup>, DU Xing-min<sup>1</sup>

(1. The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China; 2. Beijing Aeronautical Technology Research Center, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Properties of Bluetooth frequency hopping sequences, including Hamming correlation property, property of balance, multiple-access property and capacity of FH communication system, are analyzed. Some of the bluetooth FH sequences will overlap seriously if they are synchronized in time, so solutions to this problem are presented. The best one among them is, in one district, that addresses  $A_{27-0}$  of any two Bluetooth devices should be different from each other in three parts:  $A_{27-19}$ ,  $A_{18-14,12,10,8,6,4,2,0}$  and  $A_{13,11,9,7,5,3,1}$ , the more the different bits number of the Bluetooth addresses is, the better it is. The different bits should be distributed as scattered as possible.

**Key words:** FH communication; Bluetooth; FH sequences; Hamming correlation