



# 基于平均碰撞的伪随机异步 FH-CDMA 系统性能分析

郑涛<sup>1</sup>, 曾琦<sup>2</sup>

(1. 中国民航飞行学院计算机学院, 四川 广汉 618307;

2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610060)

**摘 要:** 跳频多址接入(FH-CDMA)系统采用具有伪随机特性的多进制序列(如 RS 序列、多项式序列和低碰撞区序列等)作为跳频码。目前, 基于伪随机跳频码的 FH-CDMA 系统的误码率性能估计一般采用仿真方法得到, 缺少有效的理论分析手段。提出了基于平均碰撞方法, 对频点碰撞情况进行建模, 简化了多用户的干扰分析过程, 建立了伪随机跳频序列碰撞特性与系统理论误码率性能的数值关系。通过理论分析和 MATLAB 仿真测试可知, 提出的伪随机跳频的平均碰撞分析是一种有效的多用户跳频频点碰撞和误码性能的估计方法; 另外, 给出了伪随机跳频序列可达到的最优误码率性能的下界。

**关键词:** 平均碰撞; 误码率; 伪随机跳频序列集; 跳频系统

中图分类号: TN914

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016126

## Performance analysis for pseudo-random asynchronous FH-CDMA system based on average-hit method

ZHENG Tao<sup>1</sup>, ZENG Qi<sup>2</sup>

1. College of Computer, the Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China

2. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610060, China

**Abstract:** The pseudo-random M-ary sequence (such as RS code, polynomial code and low-hit zone FH code and so forth) is widely adopted as FH code in FH-CDMA system. However, the performance of FH-CDMA system employing FH sequence is usually evaluated by simulation, and lack of substantial theoretical analysis. A systematic method for modeling the frequency-hit according to the pre-assigned FH code was proposed; then with the proposed model, the analysis for multi-access interference(MAI) was simplified. The numerical relation between the properties of pseudo-random FH code and the error-rate performance of FH-CDMA system was established. Theoretical and simulation results show that the proposed average-hit model is an efficient method to evaluate the frequency hit and the error-rate of pseudo-randomly FH-CDMA system. Meanwhile, the optimal error-rate low-bound of FH-CDMA system which can achieved by pseudo-random FH code is shown in the conclusion.

**Key words:** average-hit, error-rate, pseudo-random FH code, FH system

## 1 引言

跳频码分多址接入(FH-CDMA)系统具有抗干扰、安全可靠及容易组网等特点,因而在军事无线电通信、移动通信、雷达和声纳回波定位系统中得到了大量的应用。在FH-CDMA系统中,跳频序列集中每个序列唯一地分配给不同用户使用。在同一时刻,当至少一个用户与参考用户使用相同频点时,则产生多用户干扰(MAI)。这种相互干扰的大小密切依赖跳频序列的互碰撞特性<sup>[1]</sup>。

目前,对FH-CDMA系统理论的性能分析均采用具有良好统计特性的完全随机的跳频序列<sup>[2,3]</sup>。然而,在实际工程中,FH-CDMA系统一般采用具有伪随机特性的跳频序列集,如经典的RS码、素数跳频序列和无碰撞区序列等<sup>[4,5]</sup>。然而,这类跳频序列的频点碰撞情况与其汉明相关值紧密联系,不具有良好的统计特性;对采用这类跳频序列的FH-CDMA系统性能多采用计算机仿真方法得到,而缺少有效的理论分析<sup>[6,7]</sup>。本文针对一般的伪随机跳频序列,提出了一种有效的多用户频点碰撞理论的分析模型,即采用跳频序列集的平均碰撞对多用户的互碰撞进行分析。利用该模型可以避免讨论伪随机跳频序列具体的汉明相关性,从而简化了频点碰撞的分析过程。

参考文献[8]首次给出了伪随机跳频序列平均碰撞的定义,由定义可知,平均碰撞是从跳频序列的整个周期来描述频点的碰撞特性,因此,与已有的汉明互相关特性相比,平均碰撞更适合表征跳频系统的平均误码特性。参考文献[9]建立了在跳频序列周期时延( $Z=L$ )下,平均碰撞概率、频隙个数 $q$ 、序列周期长度 $L$ 、序列个数 $M$ 等参数之间的最优数值关系。参考文献[10]给出了伪随机跳频序列集平均部分汉明相关的理论界。近些年,出现了不少满足平均碰撞最优的跳频序列集构造算法<sup>[11,12]</sup>。

在实际的异步FH-CDMA系统中,跳频序列的时延一般在任意码片内( $0 < Z < L$ ),参考文献[9]建立的最优数值关系并不实用。因此,本文将参考文献[9]的结论推广到一般情况,给出任意时延 $Z$ 下,平均碰撞概率、频隙个数 $q$ 、序列长度 $L$ 、序列个数 $M$ 等参数之间的数值关系。然后,基于平均碰撞概念和上述数值关系,分析了伪随机跳频序列带来的多用户干扰模型,推导了伪随机异步FH-CDMA系统的理论误码率性能,建立了系统误码率与跳频序列性能之间的理论界。最后,通过MATLAB软件仿真和数值计算,给出利用平均碰撞概念分析FH-CDMA系统误码率性能

的有效性和可行性。

## 2 跳频序列集的平均碰撞

令 $C=\{c^{(1)}, c^{(2)}, \dots, c^{(M)}\}$ 是一个大小为 $M$ 、长度为 $L$ 的伪随机跳频序列集,其中,第 $k$ 个跳频序列为 $c^{(k)}=(c_0^{(k)}, c_1^{(k)}, \dots, c_{L-1}^{(k)})$ ,序列中的每个元素 $c_i^{(k)}$ 属于一个大小为 $q$ 的频隙集合 $F=\{f_1, f_2, \dots, f_q\}$ 。对于任意两个跳频序列 $c^{(i)}, c^{(j)} \in C$ 和任意正整数时延 $\tau$ , $c^{(i)}$ 和 $c^{(j)}$ 在时延 $\tau$ 的汉明相关函数 $H(x, y; \tau)$ 定义为:

$$H(x, y; \tau) = H(c^{(x)}, c^{(y)}; \tau) = \sum_{l=0}^{L-1} h(c_l^{(x)}, c_{l+\tau}^{(y)}), (\tau = 0, 1, \dots, L-1) \quad (1)$$

其中,下标 $l+\tau$ 按 $(\text{mod } L)$ 运算: $c_l^{(x)} = c_{l+\tau}^{(y)}$ 时, $h(c_l^{(x)}, c_{l+\tau}^{(y)}) = 1$ ;反之, $h(c_l^{(x)}, c_{l+\tau}^{(y)}) = 0$ 。特别地, $x=y$ 且 $\tau \neq 0$ 时, $H(x, x, \tau)$ 称为汉明自相关(自碰撞)旁瓣函数;当 $x \neq y$ 时, $H(x, x, \tau)$ 称为汉明互相关(互碰撞)函数。

在实际FH-CDMA系统中,多用户一般为异步接入跳频网(即相对时延为若干个跳频码片)。根据平均碰撞的定义,任意时延 $Z$ 下( $0 \leq Z \leq L$ ),跳频序列集 $C$ 的平均自碰撞旁瓣值 $A_b(C)$ 和平均互碰撞 $A_d(C)$ 为:

$$A_b(C) = \frac{S_b(C)}{MZ}, A_d(C) = \frac{S_d(C)}{M(M-1)(Z+1)} \quad (2)$$

其中, $S_b(C)$ 和 $S_d(C)$ 分别表示在时延 $Z$ 内,序列集 $C$ 中所有序列自碰撞旁瓣总和以及平均互碰撞的总和,它们可以表示为:

$$S_b(C) = \sum_{x \in C, 1 \leq \tau \leq Z} H(x, x; \tau) \\ S_d(C) = \sum_{x \neq y \in C, 0 \leq \tau \leq Z} H(x, y; \tau) \quad (3)$$

为了简化和方便,令 $S_b = S_b(C)$ ,  $S_d = S_d(C)$ ,  $A_b = A_b(C)$ ,  $A_d = A_d(C)$ 。

本文首先推导时延为 $Z$ 时,伪随机跳频序列集平均碰撞( $A_d, A_b$ )与其他参数( $q, L, M$ 等)之间的数值关系。

**引理 1**<sup>[1]</sup> 令跳频序列集 $C$ 的大小为 $M$ ,序列长度为 $L$ ,且频隙集 $F$ 的大小为 $q$ 。对于任意整数时延 $Z$ ,有:

$$\sum_{x, y \in C} \sum_{\tau=0}^Z H(x, y; \tau) \geq (Z+1)LM^2/q \quad (4)$$

**引理 2** 对于引理 1 所述的跳频序列集 $C$ ,其汉明相关值可进一步得到如下等式:

$$\sum_{x, y \in C} \sum_{\tau=0}^Z H(x, y; \tau) = LM + S_b + S_d \quad (5)$$



证明 由  $S_{La}$  和  $S_{Lc}$  的定义,有:

$$\sum_{x,y \in C} \sum_{\tau=0}^Z H(x,y;\tau) = \sum_{x \in C} H(x,x;0) + \sum_{x \in C} \sum_{\tau=1}^Z H(x,x;\tau) + \sum_{x \neq y \in C} \sum_{\tau=0}^Z H(x,y;\tau) = LM + S_b + S_d \quad (6)$$

由此得到引理 2。证毕。

**定理 1** 令跳频序列集  $C$  的大小为  $M$ , 序列长度为  $L$ ,  $A_b$  和  $A_d$  分别表示跳频序列集  $C$  的平均自碰撞旁瓣值和平均互碰撞值, 且频隙集  $F$  的大小为  $q$ 。对于任意整数时延  $Z$ , 有:

$$\frac{L}{Z(M-1)(Z+1)} + \frac{A_b}{(M-1)(Z+1)} + \frac{A_d}{Z} \geq \frac{ML}{qZ(M-1)} \quad (7)$$

证明 由引理 1 和引理 2, 有:

$$LM + S_b + S_d \geq (Z+1)LM^2/q$$

$$\frac{L}{Z(M-1)(Z+1)} + \frac{S_b}{ZM(M-1)(Z+1)} + \frac{S_d}{ZM(M-1)(Z+1)} \geq \frac{ML}{qZ(M-1)}$$

$$\frac{L}{Z(M-1)(Z+1)} + \frac{A_b}{(M-1)(Z+1)} + \frac{A_d}{Z} \geq \frac{ML}{qZ(M-1)} \quad (8)$$

由此, 定理 1 证毕。当取等号时, 这类伪随机跳频序列被称为平均碰撞最优跳频序列集。该定理给出了序列平均自/互碰撞值与其他参数 ( $M, L, q$ ) 之间的数值关系。当  $Z=L-1$  时, 由式 (7) 可以导出以下推论。

**推论 1** 令  $A_b$  和  $A_d$  分别表示跳频序列集在整个周期  $L$  内平均自碰撞旁瓣值和平均互碰撞值, 可以得出:

$$\frac{A_b}{(M-1)L} + \frac{A_d}{(L-1)} \geq \frac{ML-q}{q(L-1)(M-1)} \quad (9)$$

式 (9) 的结论已由参考文献 [8] 得到。因此, 式 (7) 是参考文献 [8] 结论的推广。

### 3 基于平均碰撞的 FH-CDMA 系统性能分析

在 FH-CDMA 系统中, 多用户干扰是影响系统误码率性能的主要因素之一, 而多用户干扰又与跳频序列的碰撞模型紧密联系。本节利用平均碰撞模型分析基于伪随机跳频序列 FH-CDMA 系统的性能。基于第 2 节得到的平均碰撞最优数值关系, 讨论利用平均碰撞概念分析 FH-CDMA 系统性能的可行性和有效性。

FH-CDMA 系统收发端的一般模型如图 1 所示。本文考虑 FH-CDMA 系统有  $M$  个跳频用户, 每个用户采用一跳发送一个调制符号的方式, 调制方式一般采用 FSK 调制, 解跳端采用非相干解调。系统使用的伪随机跳频序列集表

示为  $C=\{C^{(m)}\}_{m=1}^M=C(q,M,L,H_m)$ , 其中,  $q$  为跳频频隙集大小,  $M$  表示跳频序列个数,  $L$  表示跳频序列周期,  $H_m$  表示汉明自相关旁瓣/互相关最大值。

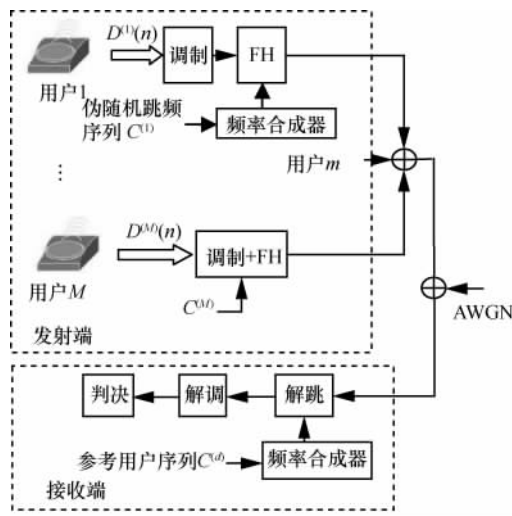


图 1 FH-CDMA 系统收发端简化模型

为了分析方便, 假设 FH-CDMA 系统相邻频点上的调制符号不存在相互干扰, 信道为 AWGN 信道, 则在接收端, 期望用户数据只受到多用户干扰和 AWGN 干扰, 参考文献 [13] 给出了该 FH-CDMA 系统误码率的一般表达式:

$$P_e = \sum_{m=0}^{M-1} \left[ \binom{M-1}{m} p_h^m (1-p_h)^{M-m} P_r(m, SNR) \right] \quad (10)$$

其中,  $P_r(m, SNR)$  表示信噪比为  $SNR$  且  $m$  个用户频点干扰时的误码率,  $P_r(0, SNR)$  表示无频点干扰时的误码率。  $p_h$  表示参考符号频点受到一个干扰用户频点碰撞的概率。为了分析方便, 本文合理地假设, 只要受到碰撞 ( $m=1, 2, \dots, M-1$ ), 参考数据的误码率  $P_r(m, SNR)=1/2$ ,  $P_r(m, SNR)$  的准确表达式可参看参考文献 [13]。

对于任意的伪随机跳频序列集  $C=\{C^{(m)}\}_{m=1}^M$  在特定的跳频接入时延  $Z$  下, 某个频点互碰撞概率  $p_h$  可以表示为:

$$p_h = \frac{A_d(C)}{L} = \frac{\sum_{\substack{x,y \in C \\ 0 \leq \tau \leq Z}} H(x,y;\tau)}{M(M-1)(Z+1)L} \quad (11)$$

将式 (11) 代入式 (10), 可得采用伪随机跳频序列  $C=\{C^{(m)}\}_{m=1}^M$  的 FH-CDMA 系统的误码率性能。进一步结合式 (7), 可得  $p_h$  的最小值, 即:

$$P_{h,optimal} = \frac{M}{Lq(M-1)} - \frac{A_b Z}{L^2(M-1)(Z+1)} - \frac{1}{L(M-1)(Z+1)} \quad (12)$$

式 (12) 代入式 (10) 所得的误码率表征了当参数  $q, M, L$  和  $Z$  一定时, 某类伪随机跳频序列  $C$  使得 FH-CDMA 系

统达到最优的理论误码率值,并建立了系统误码率与跳频序列参数的理论界。

#### 4 仿真分析与讨论

本节采用 MATLAB 软件,针对 3 个典型的伪随机跳频序列集( $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$ )进行系统误码率性能的测试。比较平均互碰撞模型和实际碰撞模型的误码率差异。上述伪随机跳频序列集分为两大类:满足 Peng-Fan 界的汉明最优跳频序列集(大多数构造的伪随机跳频序列满足该条件)及满足平均碰撞最优的跳频序列集。

(1) 经典素数跳频序列集  $E_1 = \{ \{0,1,3,2,4\}; \{0,2,1,4,3\}; \{0,3,4,1,2\}; \{0,4,2,3,1\} \}$ , 它的汉明相关性分别为:

$$\begin{aligned} H(c^{(i)}, c^{(j)}; \tau) &= \{5, 0, 0, 0, 0\}, \quad (i=1, 2, 3, 4) \\ H(c^{(i)}, c^{(j)}; \tau) &= \{1, 1, 1, 1, 1\}, \quad (i, j=1, 2, 3, 4, i \neq j) \end{aligned} \quad (13)$$

通过计算可得  $A_b=0$  和  $A_d=1$ , 代入式(7)可知,  $E_1$  满足平均碰撞最优跳频序列集。同时,  $E_1$  也是满足 Peng-Fan 界<sup>[1]</sup>的汉明最优跳频序列集。

(2) 3 次跳频序列集  $E_2 = \{ \{0,1,1,6,1,6,6\}; \{0,2,2,5,2,5,5\}; \{0,3,3,4,3,4,4\}; \{0,4,4,3,4,3,3\}; \{0,5,5,2,5,2,2\}; \{0,6,6,1,6,1,1\} \}$ , 它的汉明相关性分别为:

$$H(c^{(i)}, c^{(j)}; \tau) = \begin{cases} \{7, 2, 2, 2, 2, 2\}, & i=j \\ \{1, 3, 3, 3, 3, 3\}, & (i, j)=(1, 6), (2, 5), (3, 4) \\ \{1, 0, 0, 0, 0, 0\}, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

序列集  $E_2$  的  $A_b=2$ ,  $A_d=23/35$ ,  $E_2$  是平均碰撞最优跳频序列集, 但不满足 Peng-Fan 界。

(3) 参考文献[9]提出的满足 Peng-Fan 界的汉明最优跳频序列集  $E_3$ , 如下所示:

$$\begin{aligned} E_3 = \{ & \{2, 3, 3, 0, 1, 3, 1, 4, 4, 0, 3, 4, 3, 2, 2, 0, 4, 2, 4, 1, 1, 0, 2, 1\}, \\ & \{4, 0, 0, 2, 3, 0, 3, 1, 1, 2, 0, 1, 0, 4, 4, 2, 1, 4, 1, 3, 3, 2, 4, 3\}, \\ & \{1, 2, 2, 4, 0, 2, 0, 3, 3, 4, 2, 3, 2, 1, 1, 4, 3, 1, 3, 0, 0, 4, 1, 0\}, \\ & \{3, 4, 4, 1, 2, 4, 2, 0, 0, 1, 4, 0, 4, 3, 3, 1, 0, 3, 0, 2, 2, 1, 3, 2\}, \\ & \{0, 1, 1, 3, 4, 1, 4, 2, 2, 3, 1, 2, 1, 0, 0, 3, 2, 0, 2, 4, 4, 3, 0, 4\} \} \end{aligned} \quad (15)$$

该跳频序列的汉明相关性分别表示为:

$$\begin{aligned} H(c^{(i)}, c^{(j)}; \tau) &= \{24, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4\}, \\ & (i=1, 2, 3, 4, 5) \\ H(c^{(i)}, c^{(j)}; \tau) &= \{0, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5\}, \\ & (i, j=1, 2, 3, 4, 5, i \neq j) \end{aligned} \quad (16)$$

参数满足  $M=q=5, L=24, H_b=4, H_d=5$ 。通过计算可得  $A_b=4$ ,  $A_d=115/24$ , 该序列是平均碰撞最优跳频序列集。

在下面的仿真分析中, 多用户接入时延  $Z=2$  个码片, 调制方

式采用非相干的 2FSK 调制。图 2~图 4 分别表示 FH-CDMA 系统采用伪随机跳频序列集  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$  的理论误码率曲线和仿真曲线, 仿真还给出了不同用户数  $M$  的性能曲线。

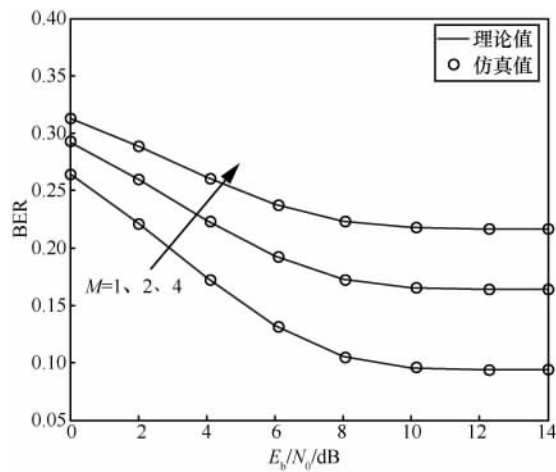


图 2 跳频系统采用序列集  $E_1$  的误码率曲线

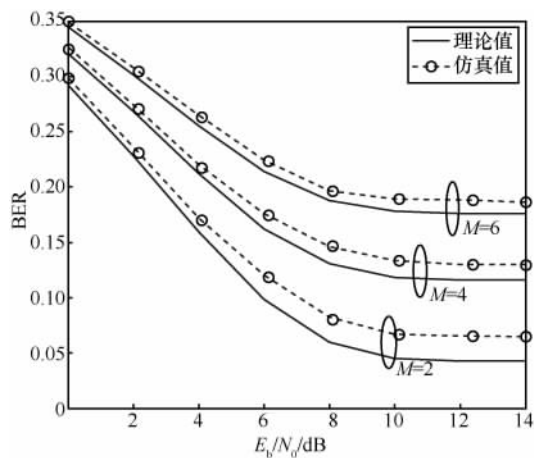


图 3 跳频系统采用序列集  $E_2$  的误码率曲线

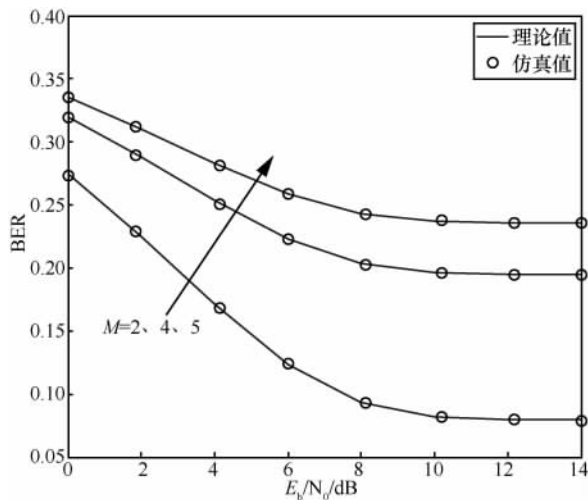


图 4 跳频系统采用序列集  $E_3$  的误码率曲线



从图2和图4可以看出,对于满足 Peng-Fan 界的汉明最优跳频序列集(如  $E_1, E_3$ ), 式(12)计算得到的理论误码率性能与实际仿真曲线十分接近,此时,平均碰撞模型是估计伪随机 FH-CDMA 系统理论误码率的一种很好的简化模型。然而,对于非汉明最优跳频序列(如  $E_2$ ),采用平均碰撞得到的理论误码率小于实际误码率,如图3所示。图3中的理论误码率曲线也说明了当参数  $q, M, L$  和  $Z$  一定时,可寻找到一类伪随机跳频序列的构造算法,使得系统误码率性能可达到理论的下界。

下面对上述结论进行简要的分析。由汉明最优跳频序列集(Peng-Fan 界)的知识<sup>[1]</sup>可知,汉明最优跳频序列集( $E_1$  和  $E_3$ )中各频点出现的概率是相同的,且频点碰撞是均匀出现的。而平均碰撞模型也正利用了频点碰撞的均匀特性。因此,对于汉明最优跳频序列集,采用平均碰撞模型能准确地分析其误码率性能,避免讨论伪随机跳频序列具体的碰撞模型;同时,对于不满足汉明最优跳频序列集的情况,平均碰撞模型只给出了采用伪随机跳频序列的 FH-CDMA 系统误码率可达到的理论下界。

除了上述3个特定跳频序列以外,本文还测试了多个特定伪随机跳频序列集,方法与结论与之类似,这里不再赘述。

## 5 结束语

针对采用伪随机跳频序列的异步 FH-CDMA 系统,本文提出了基于平均碰撞模型的 FH-CDMA 系统多址干扰分析方法。首先,给出了伪随机跳频序列平均碰撞率与频隙个数  $q$ 、序列长度  $L$ 、序列个数  $M$ 、相对时延  $Z$  等参数的数值约束关系。然后,利用该约束关系,给出了任意时延、任意跳频用户数下 FH-CDMA 系统理论误码率的求解方法及其表达式。最后通过理论分析与 MATLAB 仿真分析,给出了利用平均碰撞模型分析跳频实际碰撞的可行性。

通过分析可知,对于汉明最优的伪随机跳频序列集(大多数构造得到的伪随机跳频序列都满足该条件),本文提出的平均碰撞分析方法能非常准确地描述该 FH-CDMA 系统的实际碰撞情况;同时,平均碰撞模型给出了采用伪随机跳频序列的 FH-CDMA 系统误码率可达到的理论下界。通过寻找合适的伪随机跳频序列的构造算法,可使得 FH-CDMA 系统的误码率性能逼近该理论界。

## 参考文献:

- [1] 彭代渊, 范平志, 李门浩. 低碰撞区跳频序列周期汉明相关函数的理论限[J]. 中国科学, 2006, 36(1): 1-11.  
PENG D Y, FAN P Z, LI M H. Lower bounds on the periodic Hamming correlations of frequency hopping sequences with low hit zone[J]. Science in China, 2006, 36(1): 1-11.
- [2] 赵寰, 全厚德, 崔佩璋. 多序列跳频系统及其在 AWGN 信道下误码率性能分析[J]. 信号处理, 2013, 29(5): 600-606.  
ZHAO H, QUAN H D, CUI P Z. Multi-sequence frequency hopping system and its BER performance analysis over AWGN channel[J]. Signal Processing, 2013, 29(5): 600-606.
- [3] 董彬虹, 杜洋, 周兰林, 等. 宽带扫频干扰下 FH/MFSK 系统性能分析[J]. 电子科技大学学报, 2014, 43(5): 658-662.  
DONG B H, DU Y, ZHOU L L, et al. Performance analysis of broadband frequency sweeping jamming for FH/MFSK systems[J]. Journal of University of Electrical Science and Technology of China, 2014, 43(5): 658-662.
- [4] 邹蒙, 薛国红, 裴少婷, 等. 一种新的低/零碰撞区跳频序列构造方法[J]. 电讯技术, 2013, 53(12): 1586-1591.  
WU M, XUE G H, PEI S T, et al. A novel construction method of low / no-hit zone frequency hopping sequence set based on interleaving technique [J]. Telecommunication Engineering, 2013, 53(12): 1586-1591.
- [5] CHUNG J H, GONG G, YANG K. New families of optimal frequency-hopping sequences of composite lengths [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2014, 60(6): 3688-3697.
- [6] 叶文霞, 范平志, 郝莉. 基于无碰撞区跳频序列的两级 FFH/MFSK 系统[J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(2): 268-272.  
YE W X, FAN P Z, HAO L. Two-stage FFH/MFSK system based on frequency hopping sequence with no-hit zone [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010, 45(2): 268-272.
- [7] LIN M F, YANG G C, CHANG C Y, et al. Frequency-hopping CDMA with reed-solomon code sequences in wireless communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 2007, 55(11): 2052-2055.
- [8] PENG D Y, PENG T, FAN P Z. Generalised class of cubic frequency-hopping sequences with large family size [J]. IEEE Proceedings-Communications, 2006, 152(6): 897-902.
- [9] PENG D Y, NIU X H, TANG X H, et al. The average hamming correlation for the cubic polynomial hopping sequences [C]// International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC'08), Aug 6-8, 2008, Crete Island, the Hellenic Republic. New Jersey: IEEE Press, 2008: 464-469.
- [10] ZHOU L, PENG D. Theoretical lower bound on average periodic

partial Hamming correlations of frequency-hopping sequence set[J].  
Electronics Letter, 2015, 51(21): 1662-1664.

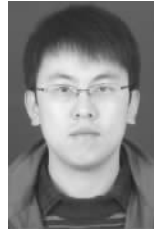
- [11] 柯品惠, 章海辉, 张胜元. 新的具有最优平均汉明相关性的跳频序列族[J]. 通信学报, 2012, 33(9): 168-175.

KE P H, ZHANG H H, ZHANG S Y. New class of frequency-hopping sequences set with optimal average Hamming correlation property [J]. Journal on Communications, 2012, 33(9): 168-175.

- [12] CHUNG J H, YANG K. New frequency-hopping sequence sets with optimal average and good maximum Hamming correlations[J]. IET Communications, 2012, 6(13): 2048-2053.

- [13] CHEUN K, STARK W E. Probability of error in frequency hopping spread-spectrum multiple-access communication systems with noncoherent reception [J]. IEEE Transactions on Communications, 1991, 39(9): 1400-1410.

#### [作者简介]



郑涛(1980-),男,中国民航飞行学院计算机学院副教授,主要研究方向为移动通信、计算机网络。



曾琦(1983-),男,博士,四川大学电气信息学院讲师,主要研究方向为扩频通信、网络控制系统。