

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.07.008

引用格式:刘钢.具有两级互碰撞特性的新型跳频序列集构造[J].电讯技术,2015,55(7):753-757.[LIU Gang. Construction of Frequency-hopping Sequence Set with Two-level Cross-hit Rates[J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(7):753-757.]

# 具有两级互碰撞特性的新型跳频序列集构造\*

刘 钢\*\*

(海军装备部 航空订货部,北京 100841)

**摘要:**为实现无线通信网灵活的多级误码率传输保证,从跳频通信的物理层技术出发,提出了一类随机性较好且具有两级互碰撞特性的新型跳频序列集。基于传统汉明最优跳频序列和代数变换,给出了一类满足两级互碰撞特性的跳频序列集的构造算法,通过实例和仿真分析了该跳频序列集的频点碰撞特性。与传统跳频序列集相比,该类跳频序列可提供两级灵活的互碰撞值,为实现跳频多址接入系统两级误码率传输保证提供了基础。该序列具有明显的性能优势,在未来民用和战术跳频通信中具有广阔的应用前景。

**关键词:**跳频多址接入系统;多级互碰撞特性;序列构造

**中图分类号:** TN914.41      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-893X(2015)07-0753-05

## Construction of Frequency-hopping Sequence Set with Two-level Cross-hit Rates

LIU Gang

(Aeronautic Equipment Order Office, Navy Equipment Department, Beijing 100841, China)

**Abstract:** To meet the flexible multi-level error-rates transmission requirements, a novel frequency-hopping (FH) sequence set with good random property and two-level cross-hit rates property is introduced from the view of physical layer in FH system. Based on the traditional FH sequence and algebra transform, a construction algorithm of the FH sequence set with two-level cross-hit property is presented, then the frequency-hit properties are illustrated by simulation and example. Compared with the traditional FH sequence, the proposed sequence set can provide two-level cross-hit rates, which is the basis to implement two-level error-rates transmission requirement for FH-CDMA system. The sequence has obvious performance advantage and will be found wide application in future civil and tactical FH communication systems.

**Key words:** FH-CDMA system; multi-level cross-hit rate property; sequence construction

### 1 引 言

跳频多址接入(FH-CDMA)系统具有抗干扰,安全可靠及组网容易等特点,因而在军事无线电通信、移动通信、现代雷达和声纳回波定位系统中得到了大量的应用<sup>[1]</sup>。在FH-CDMA系统中,当至少一

个用户与参考用户在某个时刻同时使用相同频点时,则产生多用户接入干扰(Multi-access Interference, MAI)。MAI是影响FH-CDMA系统误码率性能主要因素。从跳频序列角度来看,跳频序列的频点互碰撞值(即汉明互相关性)与MAI大小紧密联

\* 收稿日期:2015-05-20;修回日期:2015-07-13      Received date:2015-05-20;Revised date:2015-07-13

\*\* 通讯作者:acuteleopard@qq.com      Corresponding author:acuteleopard@qq.com

系<sup>[2]</sup>。一般情况下,传统伪随机跳频序列集(素数跳频序列等<sup>[1]</sup>)应满足一定的理论界(如 Lempel-Greenberger 界和 Peng-Fan 界<sup>[3]</sup>)。这些理论界说明了传统的跳频序列集的任意两条序列的互碰撞值是近似相同的<sup>[4-5]</sup>。从系统误码率性能的观点来看,这些传统跳频序列对网内用户只能提供相同的误码率等级,无法从跳频系统物理层实现多级误码率传输保证。另外,当前大多数多级传输的研究均从通信的上层(数据链路层和网络层)来实现,如传输时延、路由拥塞控制等<sup>[6-7]</sup>。

本文从跳频通信网物理层技术出发,提出一种随机性较好且满足两级互碰撞特性的跳频序列集,给出该跳频序列集的构造算法并对其性能进行分析,通过控制跳频序列的互碰撞特性实现 FH-CDMA 系统对不同误码率等级的需求。跳频序列是 FH-CDMA 系统的基础,基于该类跳频序列的跳频通信具有广泛的应用场景,例如,具有多级误码率传输需求的战术通信网、民用通信网和智能电网多级 QoS 通信架构等。

## 2 具有两级互碰撞特性跳频序列的一般要求

为了便于研究,本文只讨论具有两级互碰撞值的跳频序列集,但本节的论述可以方便地拓展到多级互碰撞情况。假设跳频系统从频点集合  $F = \{f_1, f_2, \dots, f_q\}$  中选择工作频点,频点集合大小  $|F| = q$ ;  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_K\}$  表示  $F$  上形成的跳频频率集,  $S$  中的序列个数为  $K$ , 每条跳频序列  $S_k$  的长度为  $L$ 。因此,这样的跳频序列集  $S$  可用其参数表示为  $(M, q, L, H_S(\tau))$ , 其中  $H_S(\tau)$  表示为跳频序列集  $S$  的汉明相关值,其定义详见文献[3]。

本文中具有两级互碰撞特性的跳频序列集表示为  $S$ 。根据序列互碰撞值的不同,跳频序列集  $S$  分别由两个跳频子集组成,记为  $S = [S_1; S_2]$ , 其中,跳频序列集  $S_1$  具有较小的碰撞值,可供传输质量要求高的用户使用;跳频序列集  $S_2$  具有较大的碰撞值,可供传输质量要求较低的用户使用。

具有两级互碰撞特性的新型跳频序列集合  $S$  中的单个跳频序列需要满足传统跳频序列的要求,即满足 Lempel-Greenberger 界<sup>[3]</sup>。

除此之外,该新型跳频序列集的任意两条跳频序列间互碰撞特性还应满足具有如下要求:

(1)  $S_1$  内跳频序列的互碰撞值小于  $S_2$  内跳频序

列的互碰撞值;

(2)  $S_1$  内跳频序列的互碰撞值尽可能地小,  $S_2$  内跳频序列的互碰撞值也尽可能地小;

(3)  $S_1$  和  $S_2$  之间(一条序列来自  $S_1$ , 另一条序列来自  $S_2$ ) 的互碰撞值尽可能地小。

通过与传统跳频序列的 Peng-Fan 界<sup>[3]</sup> 要求对比可知,上述新型跳频序列的频点碰撞要求是传统跳频序列的推广和深入。构造满足上述各个要求的跳频序列集是非常具有挑战性的工作。

## 3 具有两级互碰撞特性的跳频序列集构造算法

具有两级互碰撞特性的新型跳频序列集记为  $S = [S_1; S_2]$ 。首先基于低、零碰撞区跳频序列(No-Hit Zone, NHZ and Low-hit Zone, LHZ)<sup>[8]</sup> 的设计思想,构造出低互碰撞值的跳频序列子集  $S_1$ ; 然后对  $S_1$  进行代数变换得到跳频序列子集  $S_2$ 。

在设计新型跳序列  $S$  的构造算法前,首先介绍两个预备知识:传统汉明最优跳频序列集和移位变换。

### 3.1 传统汉明相关最优跳频序列集<sup>[3]</sup>

令  $C$  是一个在大小为  $q$  的频点集  $F$  上的传统跳频序列集,其序列数目为  $K$ , 序列长度为  $L$ 。如果一个序列集  $C$  的参数使得不等式(Peng-Fan 理论界)

$$H_m(C) \geq \left[ \frac{(LK-q)L}{(LK-1)q} \right] \quad (1)$$

成立,则称  $C$  为汉明相关最优的跳频序列集。式中,  $H_m(C)$  表示跳频序列集  $C$  最大(互、自)碰撞值,具体可以表示为

$$H_m(C) = \max \left\{ \max_{X \in S} H(X), \max_{X, Y \in C, X \neq Y} H(X, Y) \right\},$$

$$H(X) = \max_{1 \leq \tau < L} \{ H_{X, X}(\tau) \},$$

$$H(X, Y) = \max_{0 \leq \tau < L, X \neq Y} \{ H_{X, Y}(\tau) \}.$$

目前,传统跳频序列集的构造均是以满足不等式(1)取等号为设计目标<sup>[9-10]</sup>。

### 3.2 移位变换算子

假设  $f^v \{C^{(k)}\}$  是对序列  $C^{(k)}$  进行  $v$  比特位的循环移位变换算子。如果  $v$  为正整数,  $f^v \{C^{(k)}\}$  表示  $C^{(k)}$  向左循环移  $v$  比特位;如果  $v$  为负整数,  $C^{(k)}$  向右循环移  $v$  比特位。

下面介绍具有两级互碰撞特性的跳频序列集的

构造算法。假设传统跳频序列集采用经典的素数跳频序列,素数跳频序列记为  $C = \{C^{(k)}, k = 1, 2, \dots, K_c\}$ ,  $p$  是一个给定素数,  $L_c$  表示序列长度,其中每条序列表示为  $C^{(k)} = \{c_l^{(k)} \mid c_l^{(k)} \in GF(p), l = 0, 1, 2, \dots, L_c - 1\}$ 。素数跳频序列构造与结构详见文献[1]。本算法不局限于采用素数跳频序列作为构造基础,稍作修改后可扩展到采用任意传统跳频序列集。

**步骤 1:**选择素数跳频序列集  $C$  中的任意一条序列  $C^{(k_1)}$  (整数  $k_1 \in [1, K_c]$ ), 并对  $C^{(k_1)}$  进行多次移位变换得到一个新的跳频序列集  $T$ , 表示为

$$T = \{T^{(v)}\}_v = \{f^{(v)}\{C^{(k_1)}\} \mid v = 1, 2, \dots, L_c\}。$$

为了简化描述,将  $T$  记为

$$T = \{t_l^{(v)} \mid l = 0, 1, 2, \dots, p-1; v = 1, 2, \dots, p\}; \quad (2)$$

**步骤 2:**素数跳频序列集  $C$  中排除  $C^{(k_1)}$  后的序列集合表示为  $C'$ , 即

$$C' = \{C^{(k)} \mid k = 1, 2, \dots, k_1 - 1, k_2 - 1, \dots, K_c\}; \quad (3)$$

**步骤 3:**新型跳频序列集的两个跳频序列子集  $S_1$  和  $S_2$  分别表示为

$$\begin{aligned} S_1 &= \{S_1^{(k)}\} = \\ &\{u_n^{(k)} \mid n = 0, 1, 2, \dots, L_{S1}; k = 1, 2, \dots, K_{S1}\}, \\ S_2 &= \{S_2^{(k)}\} = \\ &\{w_n^{(k)} \mid n = 0, 1, 2, \dots, L_{S2}; k = 1, 2, \dots, K_{S2}\}。 \end{aligned} \quad (4)$$

结合低、零碰撞跳频序列的构造方法,定义一个较小的正整数  $Z (<< L_c)$ , 跳频序列子集  $S_1$  可由下面的算法得到:

$$u_n^{(k)} = mp + g_l^{(k)} \pmod p; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} S_1^{(1)} &= \{0, 7, 14, 21, 1, 8, 15, 22, 2, 9, 16, 23, 3, 10, 17, 24, 4, 11, 18, 25, 5, 12, 19, 26, 6, 13, 20, 27\}, \\ S_1^{(2)} &= \{1, 8, 15, 22, 2, 9, 16, 23, 3, 10, 17, 24, 4, 11, 18, 25, 5, 12, 19, 26, 6, 13, 20, 27, 0, 7, 14, 21\}, \\ S_1^{(3)} &= \{2, 9, 16, 23, 3, 10, 17, 24, 4, 11, 18, 25, 5, 12, 19, 26, 6, 13, 20, 27, 0, 7, 14, 21, 1, 8, 15, 22\}, \\ S_1^{(4)} &= \{3, 10, 17, 24, 4, 11, 18, 25, 5, 12, 19, 26, 6, 13, 20, 27, 0, 7, 14, 21, 1, 8, 15, 22, 2, 9, 16, 23\}, \\ S_1^{(5)} &= \{4, 11, 18, 25, 5, 12, 19, 26, 6, 13, 20, 27, 0, 7, 14, 21, 1, 8, 15, 22, 2, 9, 16, 23, 3, 10, 17, 24\}, \\ S_1^{(6)} &= \{5, 12, 19, 26, 6, 13, 20, 27, 0, 7, 14, 21, 1, 8, 15, 22, 2, 9, 16, 23, 3, 10, 17, 24, 4, 11, 18, 25\}, \\ S_1^{(7)} &= \{6, 13, 20, 27, 0, 7, 14, 21, 1, 8, 15, 22, 2, 9, 16, 23, 3, 10, 17, 24, 4, 11, 18, 25, 5, 12, 19, 26\}; \\ S_2^{(1)} &= \{0, 21, 14, 7, 2, 23, 16, 9, 4, 25, 18, 11, 6, 27, 20, 13, 1, 22, 15, 8, 3, 24, 17, 10, 5, 26, 19, 12\}, \\ S_2^{(2)} &= \{0, 21, 14, 7, 3, 24, 17, 10, 6, 27, 20, 13, 2, 23, 16, 9, 5, 26, 19, 12, 1, 22, 15, 8, 4, 25, 18, 11\}, \\ S_2^{(3)} &= \{0, 21, 14, 7, 4, 25, 18, 11, 1, 22, 15, 8, 5, 26, 19, 12, 2, 23, 16, 9, 6, 27, 20, 13, 3, 24, 17, 10\}, \\ S_2^{(4)} &= \{0, 21, 14, 7, 5, 26, 19, 12, 3, 24, 17, 10, 1, 22, 15, 8, 6, 27, 20, 13, 4, 25, 18, 11, 2, 23, 16, 9\}, \\ S_2^{(5)} &= \{0, 21, 14, 7, 6, 27, 20, 13, 5, 26, 19, 12, 4, 25, 18, 11, 3, 24, 17, 10, 2, 23, 16, 9, 1, 22, 15, 8\}。 \end{aligned}$$

表 1 给出了部分时延  $\tau$  下跳频序列子集  $S_1$  和  $S_2$  的互碰撞值分布 ( $H_{c,S1}(\tau)$  和  $H_{c,S2}(\tau)$ ),  $S_1$  和  $S_2$  之

跳频序列子集  $S_2$  可由下面的算法得到:

$$w_n^{(k)} = \begin{cases} c_l^{(k)}, & n = (l+1)(Z+1) - 1 \\ (c_l^{(k)} - mp) \pmod{(Z+1)p}, & \text{other} \end{cases}。 \quad (6)$$

式中,  $c_l^{(k)}$  表示序列集合  $C'$  中序列  $C^{(k)}$  的元素,  $m = n \pmod{(Z+1)} + 1, l = \lfloor n / (Z+1) \rfloor$ 。

下面分析该算法得到的新型跳频序列的各参数值。由上述构造算法得到跳频序列子集  $S_1$  和  $S_2$  有  $K_{S1}$  和  $K_{S2}$  条序列, 序列长度分别表示  $L_{S1}$  和  $L_{S2}$ , 频点个数分别为  $q$ 。这些参数为可以分别为

$$\begin{aligned} L_{S1} &= L_{S2} = p(Z+1) = L_h; \\ K_{S1} &= p, K_{S2} = p-2; \\ q &= p(Z+1)。 \end{aligned} \quad (7)$$

### 4 实例与频点碰撞特性

为了更好地解释这类跳频序列的跳频序列结构和互碰撞特性,本节先给出一个例子来进行说明,随后通过仿真给出该类跳频序列集的互、自碰撞分布。虽然本节只给出了一个特例,但是基于本文的构造算法,在不同参数条件下得到的跳频序列的结构和互碰撞特性与本例类似,这里就不再赘述。

例子:令素数  $p = 7$ , 低/零碰撞碰撞窗口大小  $Z = 3$ , 根据上述的构造算法,可以得到序列长度  $L_h = 28$ , 序列个数分别为  $K_{S1} = 7$  和  $K_{S2} = 5$  的跳频序列子集  $S_1$  和  $S_2$ 。则跳频序列子集  $S_1$  和  $S_2$  分别表示为

间的互碰撞值分布 ( $H_{c,S1,S2}(\tau)$ ) 以及自碰撞值分布  $H_{a,S}(\tau)$ 。其中,虚线表示的  $|\tau| \leq Z = 3$  矩形范围为

低/零碰撞窗口大小。

表 1 跳频序列集合  $S_1, S_2$  的频点碰撞分布特性

Tabel 1 The frequency hit-rate property of proposed FH sequence set

$\tau$	$H_{c,S_1}$	$H_{c,S_2}$	$H_{c,S_1,S_2}$	$H_{a,S}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
-6	X	0	2	0
-5	X	0	0	0
-4	X	4	2	0
-3	0	0	0	0
-2	0	0	2	0
-1	0	0	0	0
0	0	4	2	28
1	0	0	0	0
2	0	0	2	0
3	0	0	0	0
4	X	4	2	0
5	X	0	0	0
6	X	0	2	0
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

从表 1 给出的互、自碰撞特性不难得出以下结论:

(1) 当相对时延  $|\tau| \leq 3$  时,  $S_1$  的互碰撞值  $H_{c,S_1}$  恒等于零, 即  $S_1$  内的所有跳频序列没有碰撞 ( $S_1$  是一类无碰撞区跳频序列); 当  $|\tau| > 3$  时,  $S_1$  会出现较大的互碰撞值, 本例中该互碰撞值  $X=0$  或 28; 不同的序列参数,  $X$  值不同;

(2)  $S_2$  内的跳频序列仅在  $\tau=0$  会发生较多的碰撞, 此时,  $S_2$  的互碰撞性能略差于  $S_1$ ;

(3) 跳频序列子集  $S_1$  和  $S_2$  之间的互碰撞值  $H_{c,S_1,S_2}$  较小;

(4) 跳频序列集  $S=[S_1; S_2]$  的自碰撞旁瓣值 ( $H_{c,S}(\tau), \tau \neq 0$ ) 恒等于 0。

综上所述, 当序列时延控制在低/零碰撞窗口内 ( $|\tau| \leq Z$ ) 时, 构造出的跳频序列  $S=[S_1; S_2]$  满足第 2 节所述的互、自碰撞特性要求。

为了描述本文提出的新型两级互碰撞特性的跳频序列的性能优势, 这里也给出了一类的传统典型跳频序列集——素数跳频序列集<sup>[3]</sup>的碰撞特性。素数跳频序列集各参数表示为  $S(M, q, L, H_s(\tau)) = S(29, 29, 29, 1)$ , 它是满足汉明相关最优的跳频序列集, 其具体的碰撞特性如表 2 所示。从表 2 可以看出, 传统的跳频序列集的任意两条跳频序列互碰撞值只有一个等级 (素数跳频序列中  $H_{c,s} = 1$ ), 因此, 无法保证用户的不同误码率的传输需求。

表 2 传统跳频序列集的频点碰撞分布特性

Table 2 The frequency hit-rate property of traditional FH sequence set

$\tau$	$H_{c,S}$	$H_{a,S}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
-6	1	1
-5	1	1
-4	1	1
-3	1	1
-2	1	1
-1	1	1
0	1	29
1	1	1
2	1	1
3	1	1
4	1	1
5	1	1
6	1	1
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

为了验证本文构造的跳频序列的有效性和随机性, 将本节构造的跳频序列各个参数 (如频点个数  $q$ 、跳频序列个数 ( $K_{S_1} + K_{S_2}$ )、最大自/互碰撞值 ( $H_{a,S}(\tau)$  和  $H_{c,S}(\tau)$ )、跳频序列长度  $L_h$  等参数) 代入现有的 Peng-Fan 理论界进行测试<sup>[3]</sup>。通过验证可知, 该跳频序列集非常接近于该理论界, 因此, 我们称本节构造出的跳频序列集为次最优跳频序列集。这也说明了本文构造的跳频序列具有较好的随机性和优异的低碰撞概率。

### 5 结束语

传统 FH-CDMA 通信系统采用的 (伪) 随机跳频序列具有同一的互碰撞特性, 这使得传统 FH-CDMA 系统只能提供同一级的误码率传输保证。为了实现跳频网内用户具有多级的误码率水平, 本文提出了一类随机性较好且具有两级互碰撞值的新型跳频序列集, 基于传统跳频序列和简单代数变换给出了该新型跳频序列的构造算法, 分析了该类跳频序列的互、自碰撞分布特性。通过与传统跳频序列集 (以素数跳频序列为例) 相比可知, 本文提出的新型跳频序列可以提供两级的互碰撞特性, 且是接近 Peng-Fan 理论界的次最优跳频序列集。今后的研究可以进一步分析该类跳频序列在跳频系统中的应用, 并深入研究采用该类跳频序列的 FH-CDMA 系统误码率性能。

## 参考文献:

- [1] 梅文华,王淑波,邱永红,等. 跳频通信[M]. 北京:国防工业出版社,2005.  
MEI Wenhua, WANG Shubo, QIU Yonghong, et al. Frequency Hopping Communication [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [2] 曾琦. 新型跳频多址接入系统及其在智能电网中的应用[D]. 成都:西南交通大学,2013.  
ZENG Qi. Novel Frequency Hopping Multi-Access System and Application in Smart Grid [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [3] Peng D Y, Fang P Z. Lower bounds on the Hamming auto- and cross correlations of frequency-hopping sequences [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(9): 2149-2153.
- [4] 张剑,周兴建,卢建川. 多网跳频序列设计[J]. 电讯技术,2012,52(2):256-259.  
ZHANG Jian, ZHOU Xingjian, LU Jianchuan. Frequency Hopping Sequences Design for Multi-network Communication Systems [J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(2): 256-259. (in Chinese)
- [5] 邬蒙,薛国红,裴少婷,等. 一种新的低/零碰撞区跳频序列集构造方法[J]. 电讯技术,2013,53(12):1586-1591.  
WU Meng, XUE Guohong, PEI Shaoting, et al. A Novel Construction Method of Low/No-hit Zone Frequency Hopping Sequence Set Based on Interleaving Technique [J]. Telecommunication Engineering, 2013 53(2): 1586-1591. (in Chinese)
- [6] Chen M. MM-QoS for BAN: Multi-level MAC-layer QoS design in body area networks [C]//Proceedings of IEEE GlobeCom 2013. Atlanta, Georgia: IEEE, 2013: 5012-5016.
- [7] Melodia T, Akyildiz I F. Cross-layer QoS-aware communication for ultra wide band wireless multimedia sensor networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2010, 28(5): 653-663.
- [8] Ye W X, Fan P Z, Gabidulin E M. Construction of non-repeating frequency-hopping sequences with no-hit zone [J]. Electronics Letters, 2006, 42(12): 681-682.
- [9] 刘方,彭代渊,范佳,等. 一类具有最优汉明自相关特性的跳频序列 [J]. 电子学报,2013,52(1):14-17.  
LIU Fang, PENG Daiyuan, FAN Jia, et al. A New Class of Frequency-hopping Sequences with Optimal Hamming Autocorrelation [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 52(1):14-17. (in Chinese)
- [10] Ding C S, Yang Y, Tang X H. Optimal sets of frequency hopping sequences from linear cyclic codes [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(7): 3605-3612.

## 作者简介:



刘 钢(1970—),男,北京人,工程师,主要研究方向为航空电子技术。

LIU Gang was born in Beijing, in 1970. He is now an engineer. His research concerns avionics system.

Email: acuteleopard@qq.com