doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.12.009

一种新的低/零碰撞区跳频序列集构造方法*

邬 蒙[1,**],薛国红[2],裴少婷[1],李明阳[3]

(1. 空军工程大学 航空航天工程学院,西安 710038; 2. 空军装备部,北京 100843;
3. 空军工程大学 综合电子信息系统与电子对抗技术研究中心,西安 710051)

摘 要:低/零碰撞区跳频序列能够应用于准同步跳频通信系统中以缓解多址干扰的影响。提出了一种新的基于交织方法的低/零碰撞区跳频序列集构造方法。针对序列集的不同参数设计合理的移位序列,通过交织变换构造具有最优或次优性的低/零碰撞区跳频序列集。对不同参数进行了数值仿真,得到和所提方法一致的结论,且该方法构造的序列集具有更低的周期碰撞次数,实用性更强。新的低/零碰撞区跳频序列集可以应用于准同步跳频通信系统中,从而获得更优的性能。

关键词:准同步跳频通信系统;码分多址;低/零碰撞区;交织变换;移位序列;最优或次优

中图分类号:TN911.22 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-893X(2013)12-1586-06

A Novel Construction Method of Low/No-Hit Zone Frequency Hopping Sequence Set Based on Interleaving Technique

WU Meng[1], XUE Guo-hong[2], PEI Shao-ting[1], LI Ming-yang[3]

(1. Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
2. Air Force Equipment Ministry, Beijing 100843, China; 3. Synthetic Electronic Information System and Electronic Countermeasure Technology Research Department, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Low/no-hit zone (LHZ/NHZ) frequency hopping (FH) sequence set can be used in quasi-synchronous code division multiple access (QS-CDMA) FH communication system to eliminate multiple access interference. In this paper, a novel construction method of LHZ/NHZ FH sequence set based on interleaving technique is derived. Optimal or sub-optimal LHZ/NHZ FH sets are constructed through interleaving transformation when shift sequences are rationally designed for variable parameters of the sequence sets. Numerical simulations for different parameters are consistent to the construction method, besides, the sequence set constructed by it has less periodical collisions and higher practicality. The novel LHZ/NHZ sequence sets can be employed in QS-CDMA FH communication systems to achieve better performance.

Key words: quasi-synchronous FH communication system; CDMA; low/no-hit zone (LHZ/NHZ); interleaving transformation; shift sequence; optimal or sub-optimal

1 引 言

跳频通信系统具有抗干扰、抗多址的能力,已经在军用和民用通信领域得到广泛应用[1]。跳频序列的性能对跳频系统影响很大,设计具有良好性能的跳频序列一直是跳频通信研究的重要内容[2]。基于有限域理论,文献[3]研究了利用迹函数和 d-型函数构造最优跳频序列的方法,该方法没有考虑序列集的构造,应用范围较窄。目前低/零碰撞区(Low Hit Zone/No Hit Zone, LHZ/ NHZ)跳频序列集的构造主要包括交织方法[4-5]和基于代数理论[6]

* **收稿日期**:2013-04-09;**修回日期**:2013-11-19 Received date: 2013-04-09; Revised date: 2013-11-19
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61174194)
Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61174194)
** **通讯作者**:wu316wu@21cn.com **Corresponding author**: wu316wu@21cn.com

的构造方法。文献[5]利用最优跳频序列基于迭代交织方法构造新的跳频序列集,但该方法对原序列有较大限制,缺乏灵活性。文献[7-9]构造了最优或近似最优的 LHZ 跳频序列,但该方法同样只能构造跳频序列。文献[10]对具有最优部分 Hamming 相关函数的跳频序列进行了研究,但部分 Hamming 相关函数不能完全表征跳频序列的碰撞性能。文献[11]构造了具有三 NHZ 的跳频序列集,多 NHZ 序列集能够充分利用跳频频隙但是需要相应的较为复杂的通信协议。文献[12]研究了具有较低平均汉明相关函数的跳频序列集,并证明任何具有一致分布的跳频序列都具有平均最优性,但是低平均相关性并不能保证低碰撞区内获得更好的效果。文献[13]利用笛卡尔积和交织方法构造了最优和准最优 LHZ 跳频序列集,且该方法获得的序列集数量较多,但是文中没有给出基于交织的具有一般性的构造方法。文献[4,14]基于交织法获得较大容量的 LHZ 跳频序列集,但是序列集的 Hamming 相关函数在序列周期内碰撞点较多。

本文提出一种基于交织变换的 LHZ/NHZ 跳频序列集构造方法。首先根据交织变换后新序列集 Hamming 相关函数的性质分析了新的 Hamming 相关值在某个区域内保持较低值时移位序列必须满足的条件,然后该方法针对序列集的不同参数设计了两种不同的移位序列。文中证明当采用这两种移位序列时,构造的 LHZ/NHZ 跳频序列集的参数具有最优性或次优性,且不要求最优性时该方法能够获得更灵活参数的 LHZ/NHZ 跳频序列集。最后通过 3 个仿真实例证明该方法的有效性,且本文方法相对于已有方法在非低/零碰撞区能够获得更低的碰撞次数,性能更优。

2　基本定义

设频隙数为 q 的频隙集 $F=\{f_0,f_1,\cdots,f_{q-1}\}$,对于任意 $f_i,f_j\in F$,令

$$h(f_i,f_j)=\begin{cases}1,\text{when } f_i=f_j\\0,\text{when } f_i\neq f_j\end{cases}\tag{1}$$

定义 1　在频隙集 F 上存在两个长度为 L 的跳频序列 $x=\{x_0,x_1,\cdots,x_{L-1}\}$,$y=\{y_0,y_1,\cdots,y_{L-1}\}$,相对时延为τ的 Hamming 相关函数定义为

$$H_{xy}(\tau)=\sum_{i=0}^{L-1}h(x_i,y_{i+\tau})\ ,0\leqslant\tau\leqslant L-1\tag{2}$$

其中,$i+\tau$按模 $L-1$ 计算。特别地,当 $x=y$ 时称其为 Hamming 自相关函数,当 $x\neq y$ 时称其为 x 和 y 的 Hamming 互相关函数。

定义 2　频隙集 F 上一个长度为 L 的跳频序列 $x=\{x_0,x_1,\cdots,x_{L-1}\}$,其 Hamming 自相关函数满足

$$H_x(\tau)\leqslant H_a,0<\tau\leqslant L-1\tag{3}$$

则称序列 x 为 q 频隙上长度为 L、最大自相关函数为 H_a的跳频序列,表示为 FHS (L,q,H_a)。

定义 3　设频隙集 F 上一 M 维跳频序列集 $C=(c^0,c^1,\cdots,c^{M-1})$,其中 $c^i=(a_0^i,a_1^i,\cdots,a_{L-1}^i)$。设 $i,j\in[0,1,\cdots,M-1]$,序列集 C 中任意两序列在一定时延范围内的 Hamming 相关函数 $H_{c^ic^j}(\tau)\leqslant H_m$,这个范围的最小值定义为低碰撞区,表示为

$$Z_{\mathrm{LH}}=\min\{\max(\tau)\mid H_{c^ic^j}(\tau)\leqslant H_m,c^i,c^j\in C\}\tag{4}$$

序列集 C 称为低碰撞区跳频序列集,表示为 LHZ $(q,L,M,Z_{\mathrm{LH}},H_m)$。当 $H_m=0$ 时,低碰撞区又称为零碰撞区,表示为 Z_{NH},相应的序列集 C 又称为零碰撞区跳频序列集,表示为 NHZ (q,L,M,Z_{NH})。

3　低/零碰撞区跳频序列集构造方法

设跳频序列 $a=(a_0,a_1,\cdots,a_{L-1})$为 FHS (L,q,H_a),$e=(e_0,e_1,\cdots,e_{N-1})$为长为 N 的移位序列。根据 a 和 e 构造一个矩阵 $\boldsymbol{U}$:

$$\boldsymbol{U}=\begin{pmatrix}a_{e_0+0}&a_{e_1+0}&\cdots&a_{e_{N-1}+0}\\a_{e_0+1}&a_{e_1+1}&\cdots&a_{e_{N-1}+1}\\\vdots&\vdots&&\vdots\\a_{e_0+L-1}&a_{e_1+L-1}&\cdots&a_{e_{N-1}+L-1}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}u_0&u_1&\cdots&u_{N-1}\\u_N&u_{N+1}&\cdots&u_{2N-1}\\\vdots&\vdots&\ddots&\vdots\\u_{N(L-1)}&u_{N(L-1)+1}&\cdots&u_{NL-1}\end{pmatrix}\tag{5}$$

定义交织序列 $u=(u_0,u_1,\cdots,u_{NL-1})$,满足 $u=I(L_e a))=I(L_{e_0}(a),L_{e_1}(a),\cdots,L_{e_{N-1}}(a))$,其中 $L_i(x)$表示对序列 x 的 i 位循环左移,$I(\boldsymbol{X})$表示对矩阵 $\boldsymbol{X}$ 进行交织。同理根据 a 和另一移位序列 $f=(f_0,f_1,\cdots,f_{N-1})$构造另一个交织序列 $v=(v_0,v_1,\cdots,v_{NL-1})=I(L_{f_0}(a),L_{f_1}(a),\cdots,L_{f_{N-1}}(a))$。设 $\tau=N\tau_1+\tau_2$,序列 u 和序列 v 的 Hamming 相关函数可以用序列 a 的 Hamming 自相关函数表示[4],满足式(6)。

$$H_{uv}(\tau)=\sum_{t=0}^{N-\tau_2-1}H_a(f_{t+\tau_2}-e_t+\tau_1)+\sum_{t=N-\tau_2}^{N-1}H_a(f_{t+\tau_2-N}-e_t+\tau_1+1)\tag{6}$$

设

$$d_{t,\tau}^{f,e}=\begin{cases}f_{t+\tau_2}-e_t+\tau_1, & 0\leqslant t\leqslant N-\tau_2-1\\ f_{t+\tau_2-N}-e_t+\tau_1+1, & N-\tau_2\leqslant t\leqslant N-1\end{cases},$$

根据式(6)易知当移位序列集满足条件 1 时基于交织方法能够构造低相关区为 Z_{LH},低相关值为 NH_a 的 LHZ 跳频序列集。

条件 1 假设存在 $0<Z_{\mathrm{LH}}\leqslant L$,当 $e\triangleq f$ 且 $0<\tau\leqslant Z_{\mathrm{LH}}$ 时或 $e\neq f$ 且 $0\leqslant\tau\leqslant Z_{\mathrm{LH}}$ 时,满足 $d_{t,\tau}^{f,e}\neq 0$。

设跳频序列 $a=(a_0,a_1,\cdots,a_{L-1})$ 为 FHS (L,q,H_a),移位序列集 $e=\{e_i\mid i\in[0,1,\cdots,M-1]\}$,其中 $e_i=\{e_i^j\mid j\in[0,1,\cdots,N-1]\}$ 为长为 N 的移位序列,当满足定理 1、定理 2 时交织序列集 $S=\{s_i\mid s_i=I(L_{e_i}(a)),i\in[0,1,\cdots,M-1]\}$ 为 LHZ/NHZ 跳频序列集。

定理 1 当 $\gcd(N,L)=1$ 时,选择 $e_i^j=(iL/M+j/N)\bmod L$,其中 $0\leqslant i\leqslant M-1,0\leqslant j\leqslant N-1$,则序列集 S 为 LHZ$(LN,q,M,L/M-1,NH_m)$。

证明 当 $\gcd(N,L)=1$ 时,易知当 $0\leqslant t\leqslant N-\tau_2-1$ 时 $d_{t,\tau}^{e_i,e_k}=\frac{\tau_2}{N}+\frac{(i-k)L}{M}+\tau_1$;当 $N-\tau_2\leqslant t\leqslant N-1$ 时 $d_{t,\tau}^{e_i,e_k}=\frac{\tau_2}{N}+\frac{(i-k)L}{M}+\tau_1$。综合可得

$$d_{t,\tau}^{e_i,e_k}=\frac{\tau}{N}+\frac{(i-k)L}{M},0\leqslant t\leqslant N-1 \tag{7}$$

当 $e_i\triangleq e_k$ 时,$d_{t,\tau}^{e_i,e_k}=\frac{\tau}{N}$,可知 $0<\tau\leqslant L/M-1$ 时 $d_{t,\tau}^{e_i,e_k}\neq 0$。当移位序列 $e_i\neq e_k$ 且延迟 $\tau=0$ 时,$d_{t,\tau}^{e_i,e_k}=\frac{(i-k)L}{M}-1\neq 0$;当移位序列 $e_i\neq e_k$ 时,由于 $\gcd(L,N)=1$ 可知,$\gcd(L/M,N)=1$ 所以 $0<\tau\leqslant L/M-1$ 时 $d_{t,\tau}^{e_i,e_k}=\frac{\tau}{N}+\frac{(i-k)L}{M}\neq 0$。根据条件 1 可知序列集 S 为 LHZ$(LN,q,M,L/M-1,NH_a)$,特别的当原序列为 NHZ 序列时,序列集 S 为 NHZ$(qN,q,M,q/M-1)$。

证毕。

定理 2 当 $L\mid N$ 时,选择 $e_i^j=(iN+j)\bmod L$,令 $M=L/N$,其中 $0\leqslant i\leqslant M-1,0\leqslant j\leqslant N-1$,则序列集 S 为 LHZ $(LN,q,M,N-2,NH_m)$。

证明 当 $L\mid N$ 时,易知当 $0\leqslant t\leqslant N-\tau_2-1$ 时 $d_{t,\tau}^{e_i,e_k}=(i-k)N+\tau_2+\tau_1$;因为 $e_i^j=e_i^{j+N}$,所以当 $N-\tau_2\leqslant t\leqslant N-1$ 时 $d_{t,\tau}^{e_i,e_k}=(i-k)N+\tau_2+\tau_1+1$。且当 $0<\tau\leqslant N-2$ 时,可知 $\tau_1=0,\tau_2=\tau$。

当 $e_i\triangleq e_k$ 且 $0<\tau\leqslant N-2$ 时,$d_{t,\tau}^{e_i,e_k}=\begin{cases}\tau, & 0\leqslant t\leqslant N-\tau-1\\ \tau+1, & N-\tau\leqslant t\leqslant N-1\end{cases}$,可知 $d_{t,\tau}^{e_i,e_k}\neq 0$。当移位序列 $e_i\neq e_k$,且延迟 $0<\tau\leqslant N-2$ 时,$0<d_{t,\tau}^{e_i,e_k}\leqslant(M-1)N+N-2+1<MN=L$。根据条件 1 可知序列集 S 为 LHZ $(LN,q,M,N-2,NH_a)$,特别的当原序列为 NHZ 序列时,序列集 S 为 NHZ$(qN,q,M,N-2)$。

证毕。

当 $L\mid N$ 时,根据以上证明过程可以得到更一般的结论,设移位序列 $e_i^j=(i(Z_{\mathrm{LH}}+2)+j)\bmod q$,则序列集 S 为 LHZ $(LN,q,M,Z_{\mathrm{LH}},NH_m)$。其中,$0<Z_{\mathrm{LH}}\leqslant N-2$。

文献[15]给出了 LHZ 和 NHZ 跳频序列集的理论界,满足式(8)和式(9)。

$$H_m\geqslant\frac{(MZ_{\mathrm{LH}}+M-q)NL}{(MZ_{\mathrm{LH}}+M-1)q} \tag{8}$$

$$\frac{ML}{q}\leqslant\left\lfloor\frac{L}{Z_{NH}+1}\right\rfloor \tag{9}$$

当 $\gcd(L,N)=1$ 时,序列集 S 的参数满足

$$NH_m\geqslant\frac{(M(L/M-1)+M-q)NL}{(M(L/M-1)+M-1)q}=N\frac{(L-q)L}{(L-1)q}=NH_m,$$

达到下界,为最优低碰撞区跳频序列集。当 $L\mid N$ 时,序列集 S 的参数满足

$$\frac{(L-q)NL}{(L-1)q}=NH_m\geqslant\frac{(L-M-q)NL}{(L-M-1)q},$$

可见序列集的低碰撞区距离最优仅相差 1,为次优 LHZ 跳频序列集。

当 $\gcd(L,N)=1$ 时,根据定理 1 构造的零碰撞区序列集为 NHZ$(qN,q,M,q/M-1)$,此时式(9)左右两边取等号,也即序列集参数达到理论界,为最优 NHZ 序列集。当 $L\mid N$ 时,将构造的序列集的参数代入式(9)得到 $\left\lfloor\frac{MN^2}{N}\right\rfloor=MN\leqslant\left\lfloor\frac{MN^2}{N-1}\right\rfloor$,所以该方法构造的序列集不具有最优性,但 Z_{NH} 距离最优仅相差 1,所以此时序列集为次优 NHZ 跳频序列集。当利用定理 2 构造更一般的情况时,序列集不具有最优或次优性,但是构造的序列集参数更灵活。

4 数值仿真

仿真 $q\mid N$ 的情况,选取 NHZ 序列 $a=(0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15)$,其余参数如表 1 所示。

表 1 $q\mid N$ 时的仿真参数

Table 1 Simulation parameters when $q\mid N$

q	M	Z_{NH}	N	L	e
16	4	2	4	64	(0,1,2,3;4,5,6,7;8,9,10,11;12,13,14,15)

根据定理 2 构造序列集 $S=(s_i \mid i\in[0,1,2,3])$,其中:

$s_0=(0,1,2,3,1,2,3,4,2,3,4,5,3,4,5,6,\cdots)$,

$s_1=(4,5,6,7,5,6,7,8,6,7,8,9,7,8,9,10,\cdots)$,

$s_2=(8,9,10,11,9,10,11,12,10,11,12,13,11,12,13,14,\cdots)$,

$s_3=(12,13,14,15,13,14,15,0,14,15,0,1,15,0,1,2,\cdots)$。

其 Hamming 相关函数为

$Hs_0s_0=Hs_1s_1=Hs_2s_2=Hs_3s_3=(64,0(2),\cdots)$,

$Hs_0s_1=Hs_1s_2=Hs_2s_3=Hs_3s_0=(0(7),16,0(2),\cdots)$,

$Hs_0s_2=Hs_1s_3=Hs_2s_0=Hs_3s_1=(0(23),16,0(2),\cdots)$,

$Hs_0s_3=Hs_1s_0=Hs_2s_1=Hs_3s_2=(0(39),16,0(2),\cdots)$。

其部分相关函数如图 1 所示。

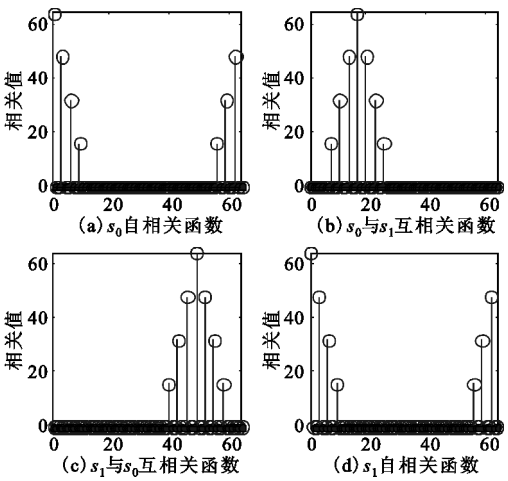

图 1　本文构造的零碰撞区序列集相关函数

Fig. 1 Correlation function of the NHZ sequence set constructed in this paper

由图 1 可知,零碰撞区为 $2=N-2$,和定理 2 结论一致,此时可以构造次优低/零碰撞区跳频序列集。

仿真 $\gcd(q,N)=1$ 的情况,选取 LHZ 序列 $a=(1,1,0,1,6,2,4,5,6,6,0,6,1,5,3,2)$,其余仿真参数如表 2 所示。

表 2　$\gcd(q,N)=1$ 时的仿真参数

Table 1 Simulation parameters when $\gcd(q,N)=1$

q	M	Z_{NH}	N	L	e
16	4	3	5	80	(0,13,10,7,4;4,1,14,11,8;8,5,2,15,12;12,9,6,3,0)

根据定理 1 构造序列集 $S=(s_i \mid i\in[0,1,2,3])$,其中:

$s_0=(1,2,0,2,6,1,4,6,1,2,0,5,1,1,4,1,\cdots)$,

$s_1=(6,6,3,1,6,2,0,2,6,6,4,6,1,2,0,5,\cdots)$,

$s_2=(6,5,0,5,1,6,3,1,6,5,0,2,6,6,3,6,\cdots)$,

$s_3=(1,1,4,6,1,5,0,5,1,1,3,1,6,5,0,2,\cdots)$。

其 Hamming 相关函数为

$Hs_0s_0=Hs_1s_1=Hs_2s_2=Hs_3s_3=(80,10(7),\cdots)$,

$Hs_0s_1=Hs_1s_2=Hs_2s_3=Hs_3s_0=(10(4),24,0(7),\cdots)$,

$Hs_0s_2=Hs_1s_3=Hs_2s_0=Hs_3s_1=(10(8),52,10(7),\cdots)$,

$Hs_0s_3=Hs_1s_0=Hs_2s_1=Hs_3s_2=(10(4),66,0(7),\cdots)$。

其中,$x(y)$ 表示连续 y 个 x。其部分相关函数如图 2 所示。

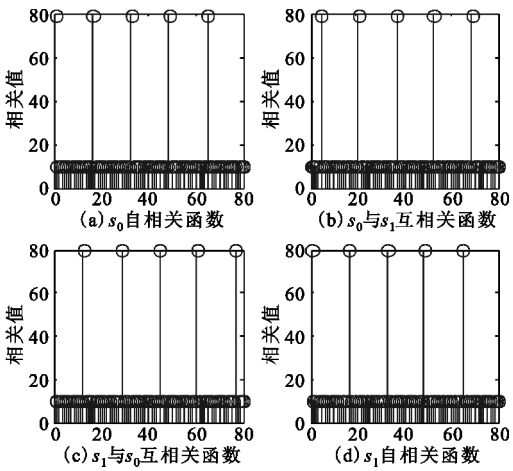

图 2　本文构造的低碰撞区序列集相关函数

Fig. 1 Correlation function of the LHZ sequence set constructed in this paper

由图 2 可知,序列集的零碰撞区为 $3=L/M-1$,和定理 1 结论一致,此时可以构造最优 NHZ 跳频序列集。同时由图 2 可以直观地看出,本文方法构造的 NHZ 序列集具有均匀分布的零碰撞区,在 QS-CDMA 跳频通信系统中可以利用合理的通信协议[11]对这些零碰撞区加以利用。

选取 $a=(0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15)$,其余参数同表 2。根据定理 1 构造序列集 $S=\{s_i \mid i=[0,1,2,3]\}$,其中:

$s_0=(0,13,10,7,4,1,14,11,8,5,2,15,12,9,6,3,\cdots)$,

$s_1=(4,1,14,11,8,5,2,15,12,9,6,3,0,13,10,7,\cdots)$,

$s_2=(8,5,2,15,12,9,6,3,0,13,10,7,4,1,14,11,\cdots)$,

$s_3=(12,9,6,3,0,13,10,7,4,1,14,11,8,5,2,15,\cdots)$。

序列集的汉明相关函数为

$Hs_0s_0=Hs_1s_1=Hs_2s_2=Hs_3s_3=(80,0(15),\cdots)$,

$Hs_0s_1=Hs_1s_2=Hs_2s_3=Hs_3s_0=(0(4),80,0(15),\cdots)$,

$Hs_0s_2=Hs_1s_3=Hs_2s_0=Hs_3s_1=(0(8),80,0(15),\cdots)$,

$Hs_0s_3=Hs_1s_0=Hs_2s_1=Hs_3s_2=(0(12),80,0(15),\cdots)$。

参数不变,利用文献[14]方法构造 NHZ 跳频序列集,两种方法构造的序列集的部分相关函数如图 3 所示。

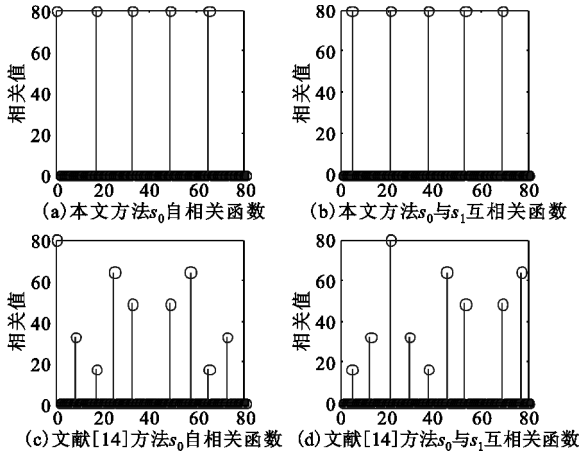

图3 该方法和文献[14]方法构造的序列集的部分相关函数
Fig. 1 Comparison of part correlation function of the sequence set constructed in this paper and reference[14]

由图 3 可以看出,两种方法构造的序列集的零碰撞区都为 $3 = L/M - 1$,即两者都可以构造最优 NHZ 跳频序列集。然而一周期内文献[14]方法碰撞 9 次而本文方法周期碰撞次数为 5 次,本文方法构造的序列集周期碰撞次数更少。

5 结束语

本文提出了一种基于交织变换的低/零碰撞区跳频序列集构造方法,该方法针对原序列长度与移位序列长度互素和原序列长度是移位序列长度整数倍两种情况分别给出不同的移位序列。当选择的频隙长度和移位序列长度互素时该方法可构造最优低/零碰撞区跳频序列集,当频隙长度是移位序列长度的整数倍时,可以构造次优低/零碰撞区跳频序列集。且在不要求最优性时,该方法可以根据低/零碰撞区的长度构造具有灵活参数的调频序列集。该方法构造的序列集具有较为规律的低/碰撞区分布,相对于已有方法具有更少的周期碰撞次数,因而可以降低跳频通信协议复杂度,具有更高的实用性。已有的研究都是基于无符号交织,有符号交织有望获得新的更优的跳频序列集。

参考文献:

[1] Zeng Q, Peng D Y, Wang X N. Performance of a Novel NFSK/FHMA system employing no-hit zone sequence set over rayleigh fading channel[J]. IEICE Transactions on Communications,2011, E94-B(2): 526-532.

[2] Zeng Q, Li H, Peng D Y. Frequency-Hopping Based Communication Network With Multi-Level QoSs in Smart Grid: Code Design and Performance Analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2012, 3(4): 1841-1852.

[3] 刘方, 彭代渊, 范平志, 等. 一类具有最优汉明自相关特性的跳频序列[J]. 电子学报,2013,41(1):13-17. LIU Fang, PENG Dai-yuan, FAN Ping-zhi, et al. A new class of frequency-hopping sequences with optimal Hamming autocorrelation[J]. Acta Electronica Sinica,2013, 41(1): 13-17. (in Chinese)

[4] Niu X H, Peng D Y, Zhou Z C. New classes of optimal low hit zone frequency hopping sequences with new parameters by interleaving techinique[J]. IEICE Transactions on Fundametals of Electroincs, Communications and Computer Science,2012, E95-A(11):1835-1842.

[5] Zeng X Y, Cai H, Tang X H, et al. A class of optimal frequency hopping sequences with new parameters[J]. IEEE Transactions on Information Theory,2012, 58(7): 4899-4907.

[6] Chung J H, Yang K. K-fold cyclotomy and its application to frequency-hopping sequences[J]. IEEE Transactions on Information Theory,2011, 57(4): 2306-2317.

[7] Ma W P, Sun S H. New designs of frequency hopping sequences with low hit zone[J]. Designs, Codes and Crytography,2011,60(2):145-153.

[8] Chung J H, Han Y K, Yangk Y. No-hit zone frequency-hopping sequence sets with optimal Hamming autocorrelation[J]. IEICE Transactions on Fundamental of Electronics, Communications and Computer,2010, E93-A(11): 2239-2244.

[9] Chung J H, Yang K. Optimal frequency-hopping sequences with new parameters[J]. IEEE Transactions on Information Theory,2010, 56(4):1685-1693.

[10] Zhou Z C, Tang X H, Niu X H, et al. New classes of frequency-hopping sequences with optimal partial correlation[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2012, 58(1): 453-458.

[11] Jiang X Y, Zhang C, Lu J H. Time-frequency hopping sequences with three no hit zones[J]. Wireless Network,2009, 15(1): 455-461.

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

[13] Chung J H, Yang K. New classes of optimal low-hit-zone frequency-hopping sequence sets by Cartesian product[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2013, 59(1): 726-732.

[14] Niu X H, Peng D Y, Zhou Z C. New classes of optimal frequency hopping sequences with low hit zone with new parameters [C]//Proceedings of Fifth International Workshop on Signal Design and its Applications in Communications. Guilin: IEEE, 2011: 111-114.

[15] Fan P Z, Peng D Y, Suehiro N. Theoretical bound on

no hit zone of frequency hopping sequences[C]// Proceedings of Fifth International Workshop on Signal Design and its Applications in Communications. Guilin: IEEE, 2011: 115-117.

作者简介:

邬　蒙(1978—),男,陕西西安人,2005 年于空军工程大学获硕士学位,现为讲师,主要研究方向为信号与信息处理;

WU Meng was born in Xi′an, Shaanxi Province, in 1978. He received the M. S. degree from Air Force Engineering University in 2005. He is now a lecturer. His research concerns signal and information processing.

Email:wu316wu@21cn.com

薛国红(1983—),男,山西万荣人,2009 年于空军工程大学获硕士学位,现为工程师,主要研究方向为装备管理;

XUE Guo-hong was born in Wanrong, Shanxi Province, in 1983. He received the M. S. degree from Air Force Engineering University in 2009. He is now an engineer. His research concerns equipment management.

裴少婷(1986—),女,山西长治人,2013 年于空军工程大学获硕士学位,现为讲师,主要研究方向为计算机科学;

PEI Shao-ting was born in Changzhi, Shanxi Province, in 1986. She received the M. S. degree from Air Force Engineering University in 2013. She is now a lecturer. Her research concerns computer science.

李明阳(1985—),男,河北保定人,2010 年于空军工程大学获硕士学位,现为博士研究生,主要研究方向为扩频通信。

LI Ming-yang was born in Baoding, Hebei Province, in 1985. He received the M. S. degree from Air Force Engineering University in 2010. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns spread spectrum communication.