一类由交织方式构造的二元 ZCZ 序列簇

王劲松　　戚文峰
(郑州信息工程大学应用数学系　郑州　450002)

摘　要：2000 年，Tang，Fan 和 Matsufuji 给出 (L,M,Z_{cz}) –ZCZ 序列簇的理论界为 $Z_{cz} \le L/M-1$。给定正整数 n 和 L，本文给出一个交织 ZCZ 序列簇的构造算法，该算法由 L 条周期为 L 的正交序列簇生成一类 $(2^{n+1}L,2L,2^{n-1})$ -ZCZ 序列簇。若 $n \ge 2$ 且 $4 \mid \tau$，该类 ZCZ 序列簇中编号为奇数的序列与编号为偶数的序列在移位为 τ 时相关值为零。此外，选择不同的正交序列簇或不同的移位序列，经构造算法可以生成不同的 ZCZ 序列簇。

关键词：准同步 CDMA 通信系统；ZCZ 序列簇；正交序列簇
中图分类号：TN914.53　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1009-5896(2007)07-1573-03

A Class of Binary ZCZ Sequence Families Constructed by Interleaved Methods

Wang Jin-song　　Qi Wen-feng
(*Department of Applied Mathematics*, *Zhengzhou Information Engineering University*, *Zhengzhou* 450002, *China*)

Abstract: In 2000, Tang, Fan and Matsufuji presented the theoretical bound of an (L,M,Z_{cz}) –ZCZ sequence family is $Z_{cz} \le L/M-1$. In this paper, for given positive integers n and L, a construction algorithm of interleaved ZCZ sequence families is proposed, by which a class of binary $(2^{n+1}L,2L,2^{n-1})$ –ZCZ sequence families can be generated from an orthogonal sequence family composed of L sequences with period L. If $n \ge 2$ and $4 \mid \tau$, the correlation value between even-number-indexed sequences and odd-number-indexed sequences with shift τ of this sequence family is zero. Furthermore, choose different orthogonal sequence families or different shift sequences, different ZCZ sequence families can be generated by this construction algorithm.

Key words: AS-CDMA communication systems; ZCZ sequence families; Orthogonal sequences

1　引言

1994 年Suehiro[1]提出了准同步CDMA通信系统的概念:在该系统中，所有用户均可以在一段时间间隔内完成同步操作，因而准同步CDMA通信系统可以有效地防止多径干扰，它主要是通过ZCZ序列簇来实现这种优越性的。

由 M 条周期为 L 零相关区长度为 Z_{cz} 的序列组成的序列簇简记为 (L,M,Z_{cz}) -ZCZ 序列簇。文献[2–5]给出了几种 ZCZ 序列簇的构造方法：Fan 等由正交互补集递归构造了 $(4^n L_0M_0,2^n M_0,2^{n-1}L_0)$ –ZCZ 和 $(2^{2n-1}L_0M_0,2^n M_0,2^{n-2}L_0)$ -ZCZ 序列簇，其中 L_0 和 M_0 分别为初始递归构造中选用的正交互补集中序列的长度和所含序列的数目；Torri，Suehiro 和 Nakamura 由 perfect 序列和酉矩阵构造了 $(l\cdot l_1^n,l_1,(l-2)\cdot l_1^{n-1})$ 和 $(l\cdot l_3^n,l_3,(l-2)\cdot l_3^{n-1})$ -ZCZ 序列簇，其中 l 为 perfect 序列的周期，l_1 和 l_3 分别为酉矩阵的行向量的个数且满足 $l_1 \mid l, l \mid l_3$；Hayashi 由 Hadamard 矩阵构造了一类 $(2^{m+1}\cdot n, 2n,2^{m-1})$ -ZCZ 序列簇，其中 n 为 Hadamard 矩阵行向量的个数。

对于给定的整数 n 和 L，本文由 L 条周期为 L 的正交序列簇递归构造了一类 $(2^{n+1}L,2L,2^{n-1})$ -ZCZ 序列簇。若 $n \ge 2$ 且 $4|\tau$，本文构造的 ZCZ 序列簇满足编号为奇数的序列和编号为偶数的序列移位为 τ 时相关值为零。此外，选择不同的正交序列簇和不同的移位序列，可以生成不同的 ZCZ 序列簇，其实，Hayashi 在文献[5]中构造的序列簇可看作是本文构造的 ZCZ 序列簇的特殊情形。

2　准备知识

下面简要介绍本文中用到的定义和符号，这里讨论的二元序列均是 1，–1 序列。

设 $\underline{a}=(a(0),a(1),\cdots,a(L-1),\cdots)$ 是一条周期为 L 的二元序列，对任何 $i>0$，左移算子 L^i 作用在 $\underline{a}$ 上定义为 $L^i(\underline{a})=(a(i),a(i+1),\cdots)$。特别地定义 $L^0(\underline{a})=\underline{a}$，$\underline{a}$ 的互补序列 $-\underline{a}=(-a(0),-a(1),\cdots,-a(L-1),\cdots)$。

设 $\underline{a}^{(0)}=(a^{(0)}(0),a^{(0)}(1),\cdots,a^{(0)}(L-1),\cdots)$ 和 $\underline{a}^{(1)}=(a^{(1)}(0), a^{(1)}(1),\cdots,a^{(1)}(L-1),\cdots)$ 是两条周期为 L 的二元序列，定义交织操作

$$d(\underline{a}^{(0)},\underline{a}^{(1)})=(\underline{a}^{(0)}(0),\underline{a}^{(1)}(0),\underline{a}^{(0)}(1),\underline{a}^{(1)}(1), \cdots,\underline{a}^{(0)}(L-1),\underline{a}^{(1)}(L-1),\cdots)$$

$(\underline{a}^{(0)},\underline{a}^{(1)})(i)=a^{(i\%2)}\left(\lfloor i/2\rfloor\right)$，其中 $\lfloor i/2\rfloor$ 和 $i\%2$ 分别为 $i/2$ 的整数部分和余数部分。再定义连接操作

2005-10-14 收到，2006-03-29 改回
国家自然科学基金(60373092)资助课题

$$[\underline{a}^{(0)},\underline{a}^{(1)}]=(a^{(0)}(0),a^{(0)}(1),\cdots,a^{(0)}(L-1),a^{(1)}(0),a^{(1)}(1),\cdots,a^{(1)}(L-1),\cdots)$$

设 $A=\{\underline{a}^{(0)},\underline{a}^{(1)},\cdots,\underline{a}^{(M-1)}\}$ 是由 M 条周期为 L 的序列组成的序列簇，其中

$$\underline{a}^{(i)}=(\underline{a}^{(i)}(0),\underline{a}^{(i)}(1),\cdots,\underline{a}^{(i)}(L-1),\cdots)$$

记 $C_{i,j}(\tau)$ 为序列 $\underline{a}^{(i)}$ 和 $\underline{a}^{(j)}$ 移位为 τ 的互相关函数， 即

$$C_{i,j}(\tau)=\sum_{t=0}^{L-1}(-1)^{a^{(i)}(t)-a^{(j)}((t+\tau)\bmod L)}$$

则零相关区长度 Z_{cz} 定义为[5, 6]:

$Z_{cz}=\max\{N\mid 若 i\neq j,\forall -N\le\tau\le N,C_{i,j}(\tau)=0;$

$若 i=j,\forall -N\le\tau\le N 且 \tau\neq 0,C_{i,i}(\tau)=0\}$。

如果对于所有的 $0\le i\neq j\le M-1$， 均有 $C_{i,j}(0)=0$, 则称 A 为正交序列簇。 Hadamard 矩阵的行向量或列向量均可看作是一个正交序列簇。 若 $\boldsymbol{H}_0=\begin{bmatrix}1 & 1\\ 1 & -1\end{bmatrix}$， 则按照递推关系 $\boldsymbol{H}_n=\begin{bmatrix}H_{n-1} & H_{n-1}\\ H_{n-1} & -H_{n-1}\end{bmatrix}$ 可以生成一个正交序列簇。将一条周期为 v 的理想自相关序列 $\underline{a}=(a_0,a_1,\cdots,a_{v-1},\cdots)$ 按如下方式排列成一个矩阵， 也可以生成一个正交序列簇。

$$\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}1 & 1 & 1 & \dots & 1\\ 1 & a_0 & a_1 & \dots & a_{v-1}\\ 1 & a_1 & a_2 & \dots & a_0\\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots\\ 1 & a_{v-1} & a_0 & \dots & a_{v-2}\end{pmatrix}$$

事实上，由 L 条周期为 L 的序列组成的正交序列簇可看作是 $(L,L,0)$-ZCZ 序列簇。

3 主要结论

本节给出由一个周期为 L 的正交序列簇递归构造 $(2^{n+1}L,\ 2L,2^{n-1})$-ZCZ 序列簇的算法。该算法首先生成周期为 $2L$ 含有 $2L$ 条序列的序列簇 $\left\{\underline{a}_r^{(0)}\right\}$，然后对于一个固定的整数 n，递归生成含有 $2L$ 条序列的序列簇 $\left\{\underline{a}_r^{(n)}\right\}$。

算法步骤如下:

(1)　设 $\{\underline{b}_r\mid r=0,\ 1,\cdots,L-1\}$ 是由 L 条周期为 L 的序列组成的正交序列簇，其中 $\underline{b}_r=(b_{r,0},b_{r,1},\cdots,b_{r,L-1},\cdots)$。

(2)　若 $n=0$， $\{\underline{a}_r^{(0)}\}$ 可由 $\{\underline{b}_r\mid r=0,\ 1,\cdots,L-1\}$ 按如下方式生成:对于 $r=0,\ 1,\cdots,L-1$，$\underline{a}_{2r}^{(0)}=[\underline{b}_r,\underline{b}_r]$，$\underline{a}_{2r+1}^{(0)}=[\underline{b}_r,-\underline{b}_r]$。

(3)　对于 $n\ge 1$ 和 $r=0,\ 1,\cdots,2L-1$， 令

$$\underline{a}_{2r}^{(n)}=d\left(L^{e_{n,0}}(\underline{a}_{2r}^{(n-1)}),L^{e_{n,1}}(\underline{a}_{2r+1}^{(n-1)})\right)$$

$$\underline{a}_{2r+1}^{(n)}=d\left(L^{e_{n,0}}(\underline{a}_{2r}^{(n-1)}),-L^{e_{n,1}}(\underline{a}_{2r+1}^{(n-1)})\right)$$

其中 $e_{n,1}-e_{n,0}=0$ 或 $e_{n,1}-e_{n,0}=1(\bmod\ 2^nL)$。

注 1　由上述构造可知，$\{\underline{a}_r^{(n)}\}$ 具有如下特性: (1) $\underline{a}_r^{(n)}$ 的周期是 $2^{n+1}L$; (2) $\{\underline{a}_r^{(n)}\}$ 中含有 $2L$ 条序列。

值得一提的是选用不同的正交序列簇或不同的 $e_{n,0}$ 和 $e_{n,1}$，可以生成不同的 ZCZ 序列簇。 其实在构造算法中取 $e_{n,0}=e_{n,1}=0$ 即为 Hayashi 在文献[5]中构造的 ZCZ 序列簇，因而 Hayashi 的构造可看作本文的一种特殊情形。

下面 3 个引理给出序列簇 $\{\underline{a}_r^{(n)}\}$ 相关函数的计算公式。

引理 1　设 $\underline{a}_{2r}^{(n)}$ 和 $\underline{a}_{2s}^{(n)}$ 是由算法生成的两条序列， 则它们的相关函数为

(1)若 τ 为奇数且 $\tau>0$， 则

$$C_{a_{2r}^{(n)},a_{2s}^{(n)}}(\tau)=C_{a_{2r}^{(n-1)},a_{2s+1}^{(n-1)}}(e_{n,1}-e_{n,0}+(\tau-1)/2)+C_{a_{2r+1}^{(n-1)},a_{2s}^{(n-1)}}(e_{n,0}-e_{n,1}+(\tau+1)/2)\quad(1)$$

(2)若 τ 为偶数且 $\tau\ge 0$， 则

$$C_{a_{2r}^{(n)},a_{2s}^{(n)}}(\tau)=C_{a_{2r}^{(n-1)},a_{2s}^{(n-1)}}(\tau/2)+C_{a_{2r+1}^{(n-1)},a_{2s+1}^{(n-1)}}(\tau/2)\quad(2)$$

证明

$$\underline{a}_{2s}^{(n)}=d(L^{e_{n,0}}(\underline{a}_{2s}^{(n-1)}),L^{e_{n,1}}(\underline{a}_{2s+1}^{(n-1)}))$$
$$=(a_{2s}^{(n-1)}(e_{n,0}),a_{2s+1}^{(n-1)}(e_{n,1}),a_{2s}^{(n-1)}(e_{n,0}+1),a_{2s+1}^{(n-1)}(e_{n,1}+1),\cdots)$$

那么对于奇数 $\tau>0$， 有

$$L^{\tau}(\underline{a}_{2s}^{(n)})=(a_{2s+1}^{(n-1)}(e_{n,1}+(\tau-1)/2),a_{2s}^{(n-1)}(e_{n,0}+(\tau+1)/2),a_{2s+1}^{(n-1)}(e_{n,1}+(\tau+1)/2),\cdots)$$
$$=d(L^{e_{n,1}+(\tau-1)/2}(\underline{a}_{2s+1}^{(n-1)}),L^{e_{n,0}+(\tau+1)/2}(\underline{a}_{2s}^{(n-1)}))$$

于是有

$$C_{a_{2r}^{(n)},a_{2s}^{(n)}}(\tau)=C_{a_{2r}^{(n-1)},a_{2s+1}^{(n-1)}}(e_{n,1}-e_{n,0}+(\tau-1)/2)+C_{a_{2r+1}^{(n-1)},a_{2s}^{(n-1)}}(e_{n,0}-e_{n,1}+(\tau+1)/2)$$

τ 为偶数的情形可类似于 τ 是奇数的情形得到。　　　证毕

注 2　事实上，如果 $e_{n,1}$ 和 $e_{n,0}$ 不满足算法给出的限制条件，仍可按照引理 1 给出它们的相关函数。

类似地，可以得到下面两个引理

引理 2　设 $\underline{a}_{2r+1}^{(n)}$ 和 $\underline{a}_{2s+1}^{(n)}$ 是由算法生成的两条序列， 则它们的相关函数为:

(1) 若 τ 为奇数且 $\tau>0$， 则

$$C_{a_{2r+1}^{(n)},a_{2s+1}^{(n)}}(\tau)=-C_{a_{2r}^{(n-1)},a_{2s+1}^{(n-1)}}(e_{n,1}-e_{n,0}+(\tau-1)/2)-C_{a_{2r+1}^{(n-1)},a_{2s}^{(n-1)}}(e_{n,0}-e_{n,1}+(\tau+1)/2)\quad(3)$$

(2) 若 τ 为偶数且 $\tau\ge 0$， 则

$$C_{a_{2r+1}^{(n)},a_{2s+1}^{(n)}}(\tau)=C_{a_{2r}^{(n-1)},a_{2s}^{(n-1)}}(\tau/2)+C_{a_{2r+1}^{(n-1)},a_{2s+1}^{(n-1)}}(\tau/2)\quad(4)$$

引理 3　设 $\underline{a}_{2r}^{(n)}$ 和 $\underline{a}_{2s+1}^{(n)}$ 是由算法生成的两条序列，则它们的相关函数为:

(1) 若 τ 为奇数且 $\tau>0$， 则

$$C_{a_{2r}^{(n)},a_{2s+1}^{(n)}}(\tau)=-C_{a_{2r}^{(n-1)},a_{2s+1}^{(n-1)}}(e_{n,1}-e_{n,0}+(\tau-1)/2)+C_{a_{2r+1}^{(n-1)},a_{2s}^{(n-1)}}(e_{n,0}-e_{n,1}+(\tau+1)/2)\quad(5)$$

(2) 若 τ 为偶数且 $\tau\ge 0$， 则

$$C_{a_{2r}^{(n)},a_{2s+1}^{(n)}}(\tau)=C_{a_{2r}^{(n-1)},a_{2s}^{(n-1)}}(\tau/2)-C_{a_{2r+1}^{(n-1)},a_{2s+1}^{(n-1)}}(\tau/2)\quad(6)$$

这三个引理在计算 $\{\underline{a}_r^{(n)}\}$ 的零相关区长度时起到非常重要的作用。

定理 1　$\{\underline{a}_r^{(n)}\}$ 的相关函数满足

$$\forall 0 \le r \le 2L-1, \forall 0 < |\tau| \le 2^{n-1}, C_{a_r^{(n)},a_r^{(n)}}(\tau) = 0,$$

$$\forall 0 \le r \ne s \le 2L-1, \forall |\tau| \le 2^{n-1}, C_{a_r^{(n)},a_s^{(n)}}(\tau) = 0.$$

因此 $\{\underline{a}_r^{(n)}\}$ 是一个 $(2^{n+1}L, 2L, 2^{n-1})$ -ZCZ 序列簇。

证明　因为 $C_{a_r^{(n)},a_s^{(n)}}(-\tau) = C_{a_s^{(n)},a_r^{(n)}}(\tau)$ ，所以在计算 $\{\underline{a}_r^{(n)}\}$ 的零相关区长度时，只需考虑 $\tau \ge 0$ 的情况即可。

首先，很容易得到 $\{\underline{a}_r^{(0)}\}$ 的相关值，即

$$\forall 0 \le r \ne s \le 2L-1,\ C_{a_r^{(0)},a_s^{(0)}}(0) = 0 \tag{7}$$

这保证了 $\{\underline{a}_r^{(0)}\}$ 是一个 $(2L, 2L, 0)$ -ZCZ 序列簇。此外，由 $\{\underline{a}_r^{(0)}\}$ 中序列的构造方式，有

$$\forall 0 \le r, s \le L-1, \tau \le 2L,\ C_{a_{2r}^{(0)},a_{2s+1}^{(0)}}(\tau) = 0 \tag{8}$$

式(8)用来计算 $\{\underline{a}_r^{(1)}\}$ 的相关值。

接着，由式(2)，式(4)，式(6)和式(7)，可得 $\tau = 0$ 时的相关值，即

$$\forall 0 \le r \ne s \le 2L-1,\ C_{a_r^{(1)},a_s^{(1)}}(0) = 0 \tag{9}$$

对于 $\tau = 1$ 的情形，由于 $e_{n,1} - e_{n,0} = 0$ 或 $1 \pmod{2L}$ ，使用式(1)，式(3)，式(5)和式(8)可得

$$C_{a_{2r}^{(1)},a_{2s}^{(1)}}(1) = C_{a_{2r}^{(0)},a_{2s+1}^{(0)}}(e_{n,1} - e_{n,0}) + C_{a_{2r+1}^{(0)},a_{2s}^{(0)}}(e_{n,1} - e_{n,0} + 1) = 0 \tag{10}$$

$$C_{a_{2r+1}^{(1)},a_{2s+1}^{(1)}}(1) = -C_{a_{2r}^{(0)},a_{2s+1}^{(0)}}(e_{n,1} - e_{n,0}) - C_{a_{2r+1}^{(0)},a_{2s}^{(0)}}(e_{n,1} - e_{n,0} + 1) = 0 \tag{11}$$

$$C_{a_{2r}^{(1)},a_{2s+1}^{(1)}}(1) = -C_{a_{2r}^{(0)},a_{2s+1}^{(0)}}(e_{n,1} - e_{n,0}) + C_{a_{2r+1}^{(0)},a_{2s}^{(0)}}(e_{n,1} - e_{n,0} + 1) = 0 \tag{12}$$

式(9)–式(12)显示序列簇 $\{\underline{a}_r^{(1)}\}$ 是一个 $(4L, 2L, 1)$ -ZCZ 序列簇。

假设 $\{\underline{a}_r^{(n-1)}\}$ 是一个 $(2^{n-1}L, 2L, 2^{n-2})$ -ZCZ 序列簇，于是，

$$\forall 0 \le r \le 2L-1,\ \forall 0 < \tau \le 2^{n-2}, C_{a_r^{(n-1)},a_r^{(n-1)}}(\tau) = 0,$$

$$\forall 0 \le r \ne s \le 2L-1,\ \forall \tau \le 2^{n-2}, C_{a_r^{(n-1)},a_s^{(n-1)}}(\tau) = 0.$$

对于 $0 \le \tau \le 2^{n-1}$, 由式(1)–(6)给出的相关函数的递推关系和关于 $\{\underline{a}_r^{(n-1)}\}$ 相关值的假设，可得

$$\forall 0 \le r \le 2L-1,\ \forall 0 < \tau \le 2^{n-1}, C_{a_r^{(n)},a_r^{(n)}}(\tau) = 0 \tag{13}$$

$$\forall 0 \le r \ne s \le 2L-1,\ \forall \tau \le 2^{n-1}, C_{a_r^{(n)},a_s^{(n)}}(\tau) = 0 \tag{14}$$

式(13)和(14)说明如果 $\{\underline{a}_r^{(n-1)}\}$ 是一个 $(2^n L, 2L, 2^{n-2})$ -ZCZ 序列簇，那么 $\{\underline{a}_r^{(n)}\}$ 是一个 $(2^{n+1}L, 2L, 2^{n-1})$ -ZCZ 序列簇。证毕

在本文给出的构造算法中，每进行一次递归操作，序列周期扩展 2 倍，零相关区长度比初始 ZCZ 序列簇零相关区长度的 2 倍多 1，而序列数目保持不变。由于本文构造的 ZCZ 序列簇依赖于正交序列簇和移位操作 L^{e_0}, L^{e_1} 的选取，选择不同的正交序列簇和移位 e_0, e_1 ，可以生成不同的 ZCZ 序列簇。

下面研究我们构造的 ZCZ 序列簇的相关性质。

定理 2　$\{\underline{a}_r^{(n)}\}$ 的相关函数满足

$\forall 0 \le r, s \le L-1, n \ge 2$ 且 $4 \mid \tau$ ，

$C_{a_{2r}^{(n)},a_{2s+1}^{(n)}}(\tau) = C_{a_{2r+1}^{(n)},a_{2s}^{(n)}}(\tau) = 0$ 。

证明

$$C_{a_{2r}^{(n)},a_{2s+1}^{(n)}}(\tau) = -C_{a_{2r}^{(n-1)},a_{2s+1}^{(n-1)}}(e_{n,1} - e_{n,0} + (\tau-1)/2) + C_{a_{2r+1}^{(n-1)},a_{2s}^{(n-1)}}(e_{n,0} - e_{n,1} + (\tau+1)/2)$$

$$C_{a_{2r+1}^{(n)},a_{2s}^{(n)}}(\tau) = C_{a_{2r}^{(n-1)},a_{2s+1}^{(n-1)}}(e_{n,1} - e_{n,0} + (\tau-1)/2) - C_{a_{2r+1}^{(n-1)},a_{2s}^{(n-1)}}(e_{n,0} - e_{n,1} + (\tau+1)/2)$$

所以 $C_{a_{2r}^{(n)},a_{2s+1}^{(n)}}(\tau) = -C_{a_{2r+1}^{(n)},a_{2s}^{(n)}}(\tau)$ 。特别的，若 $4 \mid \tau$ 且 $n \ge 2$ ，则

$$\begin{aligned} C_{a_{2r}^{(n)},a_{2s+1}^{(n)}}(\tau) &= C_{a_{2r}^{(n-1)},a_{2s+1}^{(n-1)}}(\tau/2) - C_{a_{2r+1}^{(n-1)},a_{2s}^{(n-1)}}(\tau/2) \\ &= C_{a_{2r}^{(n-2)},a_{2s}^{(n-2)}}(\tau/4) + C_{a_{2r+1}^{(n-2)},a_{2s}^{(n-2)}}(\tau/4) \\ &\quad - C_{a_{2r}^{(n-2)},a_{2s}^{(n-2)}}(\tau/4) - C_{a_{2r+1}^{(n-2)},a_{2s+1}^{(n-2)}}(\tau/4) = 0 \end{aligned}$$

证毕

4　结束语

本文使用交织操作，移位操作和连接操作，对于给定的正整数 n 和 L ，递归设计了一类 $(2^{n+1}L, 2L, 2^{n-1})$ -ZCZ 序列簇。若 $n \ge 2$ 且 $4 \mid \tau$ ，该类 ZCZ 序列簇中编号为奇数的序列和编号为偶数的序列在移位 τ 时相关值仍为零。本文构造的 ZCZ 序列簇涵括了 Hayashi 在文献[5]中构造的 ZCZ 序列簇。

参 考 文 献

[1] Suehiro N. Approximately synchronized CDMA system without cochannel using pseudo-periodic sequences. Proc. Int. Symp. Personal communication'93, Nanjing, China, Jul. 1994: 179–184.

[2] Deng X M and Fan P Z. Spreading sequence sets with zero correlation zone. *IEE Electron. Lett.*, 2000, 36(6): 982–983.

[3] Fan P Z, Suehiro N, and Kuroyanagi N, *et al.*. Class of binary sequences with zero correlation zone. *IEE Electron. Lett.*, 1999, 35(12): 777–779.

[4] Torri H, Nakamura M, and Suehiro N. A new class of zero-correlation zone sequences. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 2004, 50(3): 559–565.

[5] Hayashi T. Binary sequences with orthogonal subsequences and zero correlation zone. *IEICE Trans. on Fundamentals*, 2002, E85-A(6): 1420–1425.

[6] Tang X H, Fan P Z, and Matsufuji S. Lower bounds on correlation of spreading sequence set with low or zero correlation zone. *Electron. Lett.*, 2000, 36(3): 551–552.

[7] Hayashi T. A New Class of Polyphase Sequence Sets with Optimal Zero-Correlation Zones. *IEICE Trans. on Fundamentals*. 2005, E88-A(7): 1987–1994.

王劲松：　男，1980 年生，博士生，研究兴趣为信息安全、扩频序列设计.

戚文峰：　男，1963 年生，教授，博士生导师，中国密码学会理事，主要研究方向为信息安全.