文章编号:1007-5321(2011)03-0017-04

ZCZ 屏蔽序列偶集的构造方法

李兆斌, 魏占祯, 池亚平
(北京电子科技学院 通信工程系, 北京 100070)

摘要: 为了拓宽准同步码分多址系统中零相关区(ZCZ)序列的设计范围,将几乎最佳屏蔽序列偶应用于 ZCZ 信号设计中,提出了一种新的 ZCZ 屏蔽序列偶集的构造方法,并给出了利用周期乘积构造法从一个酉矩阵和一个 ZCZ 屏蔽序列偶集构造出新的 ZCZ 屏蔽序列偶集的方法. 几乎最佳屏蔽序列偶和酉矩阵都很容易得到,因而使用所提方法构造出的 ZCZ 屏蔽序列偶集具有较大的容量,可更好地满足实际工程的需要.

关 键 词: 几乎最佳屏蔽序列偶; 零相关区; 周期乘积; 酉矩阵
中图分类号: TN929.533 **文献标志码**: A

Construction Methods of ZCZ Punctured Sequence Pairs Set

LI Zhao-bin, WEI Zhan-zhen, CHI Ya-ping
(Department of Communication Engineering, Beijing Electronic Science Technology Institute, Beijing 100070, China)

Abstract: In order to extend the scope of zero correlation zone (ZCZ) sequence in quasi-synchronous code division multiple access system, an almost perfect punctured binary sequence pairs is used in zero correlation zone (ZCZ) sequence pairs, a new construction method for ZCZ signals is presented. ZCZ punctured sequence pairs set can be generated from the periodic product of unitary matrix and the original ZCZ punctured sequence pairs set. The almost perfect punctured binary sequence pairs and the unitary matrix can be easily obtained, so the capacity of ZCZ punctured sequence pairs set constructed by the proposed method is so large that they can satisfy requirements of engineering applications.

Key words: almost perfect punctured sequence pairs; zero correlation zone; periodic product; unitary matrix

为了克服码分多址(CDMA)系统存在同步误差和多径干扰的问题,文献[1]提出了 ZCZ 序列集的概念. 多种 ZCZ 序列集的构造方法也相继被提出[2-7],但这些方法基本都是基于最佳序列的. 有学者将序列偶相关理论扩充到 ZCZ 序列的设计中,提出了 ZCZ 序列偶集[8-10]. 笔者将几乎最佳屏蔽序列偶等相关信号应用到 ZCZ 序列偶的构造中,提出了几种 ZCZ 屏蔽序列偶集的构造方法. 由于几乎最佳屏蔽序列偶存在范围较广,使用本文方法构造的 ZCZ 屏蔽序列偶集具有较大的容量和较长的 ZCZ.

1 基本定义

定义 1[11] 序列 $\boldsymbol{X}=(x(0),x(1),\cdots,x(N-1))$ 的 p-屏蔽序列 $\boldsymbol{Y}=(y(0),y(1),\cdots,y(N-1))$ 定义为

$$y(j)=\begin{cases}0 & j\in p \text{ 个屏蔽位}\\ x(j) & j\in N-p \text{ 个非屏蔽位}\end{cases} \tag{1}$$

其中 p 为序列 $\boldsymbol{X}$ 的屏蔽位数. 若 $x(j)\in\{-1,+1\}$,则

收稿日期: 2010-07-25
基金项目: 国家自然科学基金项目(60951001); 北京市自然科学基金项目(4102057); 国家科技支撑计划重点项目(2009BAH52B06); 中办信息安全重点实验室项目(YZDJ0804)
作者简介: 李兆斌(1977—), 男, 讲师, 博士, E-mail: bestibesti@163.com.

p-屏蔽序列 $\boldsymbol{Y}$ 称为 p-屏蔽二进序列,序列偶($\boldsymbol{X}$, $\boldsymbol{Y}$)称为屏蔽二进序列偶.

定义2[12] 屏蔽序列偶($\boldsymbol{X}$, $\boldsymbol{Y}$)的周期自相关函数定义为

$$R_{XY}(m) = \sum_{j=0}^{N-1} x(j)y(j+m)$$

其中 $j+m \equiv (j+m) \bmod N, 0 \leqslant m \leqslant N-1$. 若满足

$$R_{XY}(m) = \begin{cases} F_1 \neq 0 & m=0 \\ F_2 \neq 0 & m=a \\ 0 & m \neq 0 \text{ 且 } m \neq a \end{cases} \tag{2}$$

则称屏蔽序列偶($\boldsymbol{X}$, $\boldsymbol{Y}$)为几乎最佳屏蔽序列偶,其中 a 为屏蔽序列偶($\boldsymbol{X}$, $\boldsymbol{Y}$)中异相自相关函数不为0的点,即 $a \in \{1,2,\cdots,N-1\}$.

定义3 对于码长为 N,码字数为 M 的一组 ZCZ 屏蔽序列偶集 $\boldsymbol{C} = \{\boldsymbol{C}_0, \boldsymbol{C}_1, \cdots, \boldsymbol{C}_{M-1}\}$,其中 $\boldsymbol{C}_i = (\boldsymbol{X}_i, \boldsymbol{Y}_i)$ 为序列偶集中的屏蔽序列偶,$\boldsymbol{X}_i = (x_0^i, x_1^i, \cdots, x_{N-1}^i)$,$\boldsymbol{Y}_i = (y_0^i, y_1^i, \cdots, y_{N-1}^i)$. 如果该屏蔽序列偶集中任意2个屏蔽序列偶$\boldsymbol{C}_i$ 和$\boldsymbol{C}_j$ 的互相关函数满足

$$R_{C_iC_j}(\tau) = R_{X_iY_j}(\tau) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n^i y_{(n+\tau) \bmod N}^j = \begin{cases} F \neq 0 & \tau = 0, i=j \\ 0 & \tau=0, i \neq j \\ 0 & 0 < |\tau| \leqslant Z_0 \end{cases} \tag{3}$$

则称该屏蔽序列偶集是 ZCZ 长度为 Z_0 的 ZCZ(N, M, Z_0)屏蔽序列偶集.

2 基于几乎最佳屏蔽序列偶的 ZCZ 序列偶集的构造

下面给出基于几乎最佳屏蔽序列偶的 ZCZ 序列偶集的构造定理.

定理1 给定周期为 N_1 的几乎最佳屏蔽序列偶($\boldsymbol{X}$,$\boldsymbol{Y}$)和 $N_2 \times N_2$ 阶正交矩阵$\boldsymbol{H}_N$,且 $\gcd(N_1, N_2) = 1$. 将$\boldsymbol{H}_N$ 中第 i 个行向量 $\boldsymbol{h}_n^i$ 中的元素分别与 $\boldsymbol{X}$ 和 $\boldsymbol{Y}$ 按位相乘,得到屏蔽序列偶集 $\boldsymbol{E} = \{\boldsymbol{E}_0, \boldsymbol{E}_1, \cdots, \boldsymbol{E}_{N_2-1}\}$ 是 ZCZ(N_1N_2, N_2, $a-1$)屏蔽序列偶集,$\boldsymbol{E}_i = (\boldsymbol{C}_i, \boldsymbol{D}_i)$ 为屏蔽序列偶集中的第 i 个 N_1N_2 长屏蔽序列偶,$\boldsymbol{C}_i = (c_0^i, c_1^i, \cdots, c_{N_1N_2-1}^i)$,$\boldsymbol{D}_i = (d_0^i, d_1^i, \cdots, d_{N_1N_2-1}^i)$ $c_n^i = x_{n \bmod N_1} h_{n \bmod N_2}^i$,$d_n^i = y_{n \bmod N_1} h_{n \bmod N_2}^i$,$i = 0, 1, \cdots, N_2-1$,$n = 0, 1, \cdots, N_1N_2-1$.

证明 对于 $\boldsymbol{E}$ 中任意2个屏蔽序列偶$\boldsymbol{E}_s$ 和$\boldsymbol{E}_t$ 的互相关函数为 $R_{E_sE_t}(\tau) = \sum_{n=0}^{N_1N_2-1} x_{n \bmod N_1} h_{n \bmod N_2}^s \times y_{(n+\tau) \bmod N_2} h_{(n+\tau) \bmod N_2}^t$. $\gcd(N_1, N_2) = 1$,因此在一个 N_1N_2 周期内所有可能的乘积 $x_{n \bmod N_1} y_{(n+\tau) \bmod N_1}$ 和 $h_{n \bmod N_2}^s h_{(n+\tau) \bmod N_2}^t$ 仅可能出现1次,故有

$$R_{E_sE_t}(\tau) = \sum_{n=0}^{N_1-1} x_{n \bmod N_1} y_{(n+\tau) \bmod N_1} \sum_{n=0}^{N_2-1} h_{n \bmod N_2}^s \times h_{(n+\tau) \bmod N_2}^t = R_{XY}(\tau \bmod N_1) R_{h^sh^t}(\tau \bmod N_2)$$

当 $s=t$、$\tau=0$ 时,$R_{XY}(0) = F_1$,$R_{h^sh^t}(0) = N_2$,所以有 $R_{E_sE_t}(0) = R_{XY}(0) R_{h^sh^t}(0) = F_1N_2$.

当 $s=t$、$0<|\tau| \leqslant a-1$ 时,$R_{XY}(\tau) = 0$,$R_{h^sh^t}(\tau) = N_2$,故 $R_{E_sE_t}(\tau) = 0$.

当 $s \neq t$、$\tau = 0$ 时,$R_{h^sh^t}(0) = 0$,故 $R_{E_sE_t}(0) = R_{XY}(0) R_{h^sh^t}(0) = 0$.

当 $s \neq t$、$0 < |\tau| \leqslant a-1$ 时,$R_{h^sh^t}(\tau) = 0$,故 $R_{E_sE_t}(\tau) = R_{XY}(\tau) R_{h^sh^t}(\tau) = 0$.

综上所述,由定义3知 $\boldsymbol{E}$ 为 ZCZ(N_1N_2, N_2, $a-1$)屏蔽序列偶集.

例1 $(\boldsymbol{X}, \boldsymbol{Y}) = (++-+-, 0+00-)$ 为周期 $N_1 = 5$,$a = 4$ 的几乎最佳屏蔽序列偶,

$$\boldsymbol{H}_4 = \begin{pmatrix} + & + & + & + \\ + & - & + & - \\ + & + & - & - \\ + & - & - & + \end{pmatrix}$$

为 4×4 阶正交矩阵. 由定理1可得 ZCZ(20,4,3)屏蔽序列偶集:

$$\boldsymbol{C} = \{(\boldsymbol{X}_0, \boldsymbol{Y}_0), (\boldsymbol{X}_1, \boldsymbol{Y}_1), (\boldsymbol{X}_2, \boldsymbol{Y}_2), (\boldsymbol{X}_3, \boldsymbol{Y}_3)\}$$

$(\boldsymbol{X}_0, \boldsymbol{Y}_0) = (++-+-++-+-++-+-++-+-; 0+00-0+00-0+00-0+00-)$

$(\boldsymbol{X}_1, \boldsymbol{Y}_1) = (+-------+++++-----++++; 0-00-0+00+0-00-0+00+)$

$(\boldsymbol{X}_2, \boldsymbol{Y}_2) = (+++--+-++------++-+--+; 0+00-0-00-0-00+0+00+)$

3 周期乘积构造法

下面的定理给出了从1个酉矩阵和1个 ZCZ 屏蔽序列偶集构造出1个新的 ZCZ 屏蔽序列偶集的方法.

定义4 设 $\boldsymbol{U} = \{u_{ij}\}$ 为 $N \times N$ 阶酉矩阵,$\boldsymbol{B} = \{b^i | 1 \leqslant i \leqslant N\}$ 是含有 N 个长度为 N 的序列集合,其中 b^i 定义为

$$b^i=\{\sqrt{N}u_{i0},\sqrt{N}u_{i1},\cdots,\sqrt{N}u_{i(N-1)}\}$$

由酉矩阵的定义可知

$$|R_{b^l b^k}(0)|=\begin{cases}N & l=k\\0 & l\neq k\end{cases}$$

定理 2　设 $\boldsymbol{C}=\{\boldsymbol{C}_0,\boldsymbol{C}_1,\cdots,\boldsymbol{C}_{M_1-1}\}$ 是 ZCZ 长度为 Z 的屏蔽序列偶集，记为 $\mathrm{ZCZ}(N_1,M_1,Z)$，其中 $\boldsymbol{C}_i=(\boldsymbol{X}_i,\boldsymbol{Y}_i)$ 为序列偶集中的第 i 个 N_1 长屏蔽序列偶，$\boldsymbol{X}_i=(x_0^i,x_1^i,\cdots,x_{N_1-1}^i)$，$\boldsymbol{Y}_i=(y_0^i,y_1^i,\cdots,y_{N_1-1}^i)$，$0\leqslant i\leqslant M_1-1$；$\boldsymbol{H}=\{h^l|0\leqslant l\leqslant N_2-1\}$ 是由 N_2 阶酉矩阵按照定义 4 得到的序列集，且 N_1 和 N_2 互素，将 $\boldsymbol{H}$ 中的第 r 个行向量 $\boldsymbol{h}_n^r$ 分别与 $\boldsymbol{C}$ 中的各序列偶按位相乘，得到新的屏蔽序列偶集 $\boldsymbol{D}=\{\boldsymbol{D}_0,\boldsymbol{D}_1,\cdots,\boldsymbol{D}_{M_1N_2-1}\}$ 是 $\mathrm{ZCZ}(N_1N_2,M_1N_2,Z)$ 屏蔽序列偶集合，其中 $\boldsymbol{D}_{kr}=(\boldsymbol{A}_{kr},\boldsymbol{B}_{kr})$，$\boldsymbol{A}_{kr}=(a_0^{kr},a_1^{kr},\cdots,a_{N_1N_2-1}^{kr})$；$\boldsymbol{B}_{kr}=(b_0^{kr},b_1^{kr},\cdots,b_{N_1N_2-1}^{kr})$；$a_m^{kr}=x_{m\bmod N_1}^k h_{m\bmod N_2}^r$；$b_m^{kr}=y_{m\bmod N_1}^k h_{m\bmod N_2}^r$，$0\leqslant k\leqslant M_1-1$，$0\leqslant r\leqslant N_2-1$，$0\leqslant m\leqslant N_1N_2-1$.

证明　由定理 1 的证明过程知 $R_{D_{kl}D_{k'l'}}(\tau)=R_{C_kC_{k'}}(\tau\bmod N_1)R_{h^lh^{l'}}(\tau\bmod N_2)$，又因为 $\boldsymbol{C}$ 为 ZCZ 屏蔽序列偶集，所以

$$R_{C_kC_{k'}}(\tau)=\begin{cases}F\neq 0 & \tau=0,k=k'\\0 & \tau=0,k\neq k'\\0 & 0<|\tau|\leqslant Z\end{cases}$$

由定义 4 知

$$R_{h^lh^{l'}}(0)=\begin{cases}N & l=l'\\0 & l\neq l'\end{cases}$$

故

$$R_{D_{kl}D_{k'l'}}(\tau)=R_{C_kC_{k'}}(\tau\bmod N_1)R_{h^lh^{l'}}(\tau\bmod N_2)=\begin{cases}NR_{C_kC_{k'}}(0)\neq 0 & \tau=0,k=k',l=l'\\0 & \tau=0,k\neq k',l=l'\\0 & \tau=0,k=k',l\neq l'\\0 & \tau=0,k\neq k',l\neq l'\\0 & 0<|\tau|\leqslant Z,k=k',l=l'\\0 & 0<|\tau|\leqslant Z,k\neq k',l=l'\\0 & 0<|\tau|\leqslant Z,k=k',l\neq l'\\0 & 0<|\tau|\leqslant Z,k\neq k',l\neq l'\end{cases}$$

由定义 3 可知序列偶集 $\boldsymbol{D}$ 是 ZCZ 屏蔽序列偶集. 为证明 $\boldsymbol{D}$ 中确有 M_1N_2 个屏蔽序列偶，只需证 $\boldsymbol{D}$ 中的屏蔽序列偶两两不同即可. 不妨设 $D_{kl}=D_{k'l'}$，于是 $R_{D_{kl}D_{k'l'}}(\tau)=E$，若 $E\neq 0$，由式(4)可得 $k=k'$，$l=l'$；若 $E=0$，则 D_{kl} 和 $D_{k'l'}$ 中必至少有 1 个全零序列$(0,0,\cdots,0)$，又因为 D_{kl} 中的屏蔽序列偶是$(\boldsymbol{X}_k,\boldsymbol{Y}_k)$与 h_n^l 按位相乘的结果，$D_{k'l'}$ 中的屏蔽序列偶是$(\boldsymbol{X}_{k'},\boldsymbol{Y}_{k'})$与 $h_n^{l'}$ 按位相乘的结果，容易推知$\boldsymbol{X}_k$、$\boldsymbol{Y}_k$、$\boldsymbol{X}_{k'}$、$\boldsymbol{Y}_{k'}$、h_n^l、$h_n^{l'}$ 中至少有 1 个全零序列，而 $R_{X_kY_k}(0)\neq 0$，$R_{X_{k'}Y_{k'}}(0)\neq 0$，$h_n^l$ 和 $h_n^{l'}$ 是酉矩阵的列向量的倍数，也不可能是零向量，这就产生了矛盾，故 $D_{kl}\neq D_{k'l'}$（除 $k=k'$，$l=l'$ 外）. 综上，$\boldsymbol{D}$ 是 $\mathrm{ZCZ}(N_1N_2,M_1N_2,Z)$ 屏蔽序列偶集合.

从定理 2 可以看出，周期乘积法可成倍扩展 ZCZ 屏蔽序列偶集中序列偶的长度和数目.

例 2　取 ZCZ(10,2,4) 屏蔽序列偶集 $\boldsymbol{C}=\{(\boldsymbol{X}_0,\boldsymbol{Y}_0),(\boldsymbol{X}_1,\boldsymbol{Y}_1)\}$，其中

$$(\boldsymbol{X}_0,\boldsymbol{Y}_0)=(1,1,-1,1,-1,1,1,-1,1,-1;\\1,1,0,0,0,1,1,0,0,0)$$

$$(\boldsymbol{X}_1,\boldsymbol{Y}_1)=(1,-1,-1,-1,-1,-1,1,1,1,1;\\1,-1,0,0,0,-1,1,0,0,0)$$

酉矩阵

$$\boldsymbol{U}=\frac{1}{\sqrt{3}}\begin{bmatrix}+ & + & +\\+ & \omega & \omega^2\\+ & \omega^2 & \omega\end{bmatrix}$$

其中

$$\omega=-\frac{1}{2}+\frac{\sqrt{3}}{2}\mathrm{i}$$

由定义 4 得序列集 $\boldsymbol{H}=\{h^0,h^1,h^2\}$，其中 $h^0=(1,1,1)$、$h^1=(1,\omega,\omega^2)$、$h^2=(1,\omega^2,\omega)$.

由定理 2 可得到一个新的 ZCZ(30,6,4) 屏蔽序列偶集 $\boldsymbol{D}=\{(\boldsymbol{A}_r,\boldsymbol{B}_r)|0\leqslant r\leqslant 5\}$. 由于篇幅所限，本文只列出 $\boldsymbol{D}$ 中的部分屏蔽序列偶：

$$(\boldsymbol{A}_0,\boldsymbol{B}_0)=(1,1,-1,1,-1,1,1,-1,1,-1,1,1,\\-1,1,-1,1,1,-1,1,-1,1,1,-1,1,-1,1,1,\\-1,1,-1;1,1,0,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,\\0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0,0)$$

$$(\boldsymbol{A}_1,\boldsymbol{B}_1)=(1,-1,-1,-1,-1,-1,1,1,1,1,1,\\-1,-1,-1,-1,-1,1,1,1,1,1,-1,-1,-1,\\-1,-1,1,1,1,1;1,-1,0,0,0,-1,1,0,\\0,0,1,-1,0,0,0,-1,1,0,0,0,1,-1,\\0,0,0,-1,1,0,0,0)$$

$$(\boldsymbol{A}_2,\boldsymbol{B}_2)=(1,\omega,-\omega^2,1,-\omega,\omega^2,1,-\omega,\omega^2,\\-1,\omega,\omega^2,-1,\omega,-\omega^2,1,\omega,-\omega^2,\\1,-\omega^2,\omega^2,1,-\omega,\omega^2,-1,\omega,\omega^2,\\-1,\omega,-\omega^2;1,\omega,0,0,0,\omega^2,1,0,\\0,0,\omega,\omega^2,0,0,0,1,\omega,0,0,0,\omega^2,\\1,0,0,0,\omega,\omega^2,0,0,0)$$

4 结束语

提出了基于几乎最佳屏蔽二进序列偶和周期乘积构造ZCZ屏蔽序列偶集的新方法. 几乎最佳屏蔽二进序列偶存在范围较广,弥补了最佳周期自相关序列长度受限的缺陷,因而使用本文方法构造的ZCZ屏蔽序列偶集具有较大的容量和较长的ZCZ. 用周期乘积构造法构造的ZCZ屏蔽序列偶集与原始的屏蔽序列偶集相比,新的ZCZ屏蔽序列偶集的序列偶周期、序列偶数都有所增加,具有更大的灵活性.

参考文献:

[1] Fan Pingzhi, Suehiro N, Kuroyanagi N, et al. A class of binary sequences with zero correlation zone[J]. IEE Electronic Letters, 1999, 35(10): 777-779.

[2] 王龙业, 唐小虎. 零相关区序列的交织构造[J]. 西南交通大学学报, 2006, 41(3): 319-323.
Wagn Longye, Tang Xiaohu. Construction of sequence with zero correlation zone based on interleaved technique[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2006, 41(3): 319-323.

[3] 汪劲松, 戚文峰. 一类由交织方式构造的二元ZCZ序列簇[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(7): 1573-1575.
Wang Jinsong, Qi Wenfeng. A class of binary ZCZ sequence families constructed by interleaved methods[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2007, 29(7): 1573-1575.

[4] 左慧娟, 佟鑫, 温巧燕. 由完备序列构造零相关区序列集的方法[J]. 北京邮电大学学报, 2008, 31(4): 122-125.
Zuo Huijuang, Tong Xin, Wen Qiaoyan. Constructions of ZCZ sequence set from a perfect sequence[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2008, 31(4): 122-125.

[5] Wang Yangzhi, Xu Chengqian. Design of sequence set with group-wise zero correlation window[J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2009, 16(2): 39-41.

[6] Takafumi H. Zero-correlation sequence set constructed from a perfect sequence[J]. IEICE Trans Fundamentals, 2007, E90-A(5): 1107-1111.

[7] Takafumi H. A class of zero-correlation zone sequence set using a perfect sequence[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2009, 16(4): 331-334.

[8] 梁清梅, 许成谦, 刘金明. 一种新型零相关区序列偶集合[J]. 无线电通信技术, 2006, 32(5): 29-31.
Liang Qingmei, Xu Chengqian, Liu Jinming. A novel zero correlation zone sequence pairs set[J]. Radio Communications Technology, 2006, 32(5): 29-31.

[9] 许蕾, 蒋挺, 周正. 最佳屏蔽二进序列偶在低/零相关区中的应用研究[J]. 通信学报, 2006, 27(10): 19-24.
Xu Lei, Jiang Ting, Zhou Zheng. Research of perfect punctured binary sequence pair in LCZ/ZCZ[J]. Journal on Communications, 2006, 27(10): 19-24.

[10] 李兆斌, 蒋挺, 周正. 基于伪随机序列的零相关区三元序列偶集的研究[J]. 通信学报, 2009, 30(8): 27-31.
Li Zhaobin, Jiang Ting, Zhou Zheng. Research of ZCZ ternary sequence pairs set based on pseudorandom sequence[J]. Journal on Communications, 2009, 30(8): 27-31.

[11] 蒋挺, 赵晓群, 侯蓝田, 等. 奇周期最佳屏蔽二进序列偶[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(4): 513-516.
Jiang Ting, Zhao Xiaoqun, Hou Lantian, et al. Odd-periodic perfect punctured binary sequence pairs[J]. Systems Engineering and Electronics, 2003, 25(4): 513-516.

[12] 李兆斌, 蒋挺, 邹卫霞, 等. 几乎最佳屏蔽二进序列偶的研究[J]. 北京邮电大学学报, 2007, 30(1): 28-31.
Li Zhaobin, Jiang Ting, Zou Weixia, et al. Research of almost perfect punctured binary sequence pairs[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2007, 30(1): 28-31.