

# 基于矩阵填充和三阶相关的长短码 DS-CDMA 信号多伪码盲估计

赵知劲<sup>①②</sup> 李淼<sup>\*①</sup> 尚俊娜<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(杭州电子科技大学通信工程学院 杭州 310018)

<sup>②</sup>(中国电子科技集团第三十六研究所 嘉兴 314033)

**摘要:** 由于长短码直扩码分多址(LSC-DS-CDMA)信号包含了多个用户的长码和短码,已有的直扩码分多址信号的多伪码盲估计方法不再适用。为此该文提出一种基于矩阵填充和三阶相关的伪码估计方法。首先从理论上将结构复杂的 LSC-DS-CDMA 信号构建为多用户短码扩频的缺失矩阵模型,将复合码矩阵估计建模为盲源信号分离问题;然后将矩阵填充理论应用于复合码矩阵估计,提出基于奇异值阈值算法和快速独立成分分析算法的各用户复合码序列估计方法;最后利用  $m$  序列的移位相加性特性,提出延迟三阶相关算法,从各用户复合码序列中估计其包含的长短伪码序列。仿真表明,当信噪比高于 $-2$  dB 时,该文算法的长短伪码估计平均误码率低于 0.1%。

**关键词:** 伪码; 长短码直扩码分多址; 矩阵填充; 盲源分离; 延迟三阶相关函数

中图分类号: TN914.42

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)07-1788-06

DOI: 10.11999/JEIT151087

## Blind Estimation of LSC-DS-CDMA Signal Based on Matrix Completion and Triple Correlation

ZHAO Zhijin<sup>①②</sup> LI Miao<sup>①</sup> SHANG Junna<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

<sup>②</sup>(The 36 Research Institute of China Electronic Technology Corporation, Jiaxing 314033, China)

**Abstract:** As the Long and Short Codes Direct Sequence Code Division Multiple Access (LSC-DS-CDMA) signal contains long and short PN codes of multi-user, the existing methods of PN codes blind estimation for the Direct Sequence Code Division Multiple Access (DS-CDMA) signal are no longer applicable. Then a pseudo random (PN) codes estimation method based on matrix completion and triple correlation is proposed. Firstly, LSC-DS-CDMA signal is represented as a matrix model with missing data for multi-user short code and the composite code matrix estimation is modeled as a blind source separation problem in the theory. Secondly, matrix completion theory is used to estimate the composite code subspace. A method of the composite code sequences estimation is proposed based on the singular value thresholding algorithm and Fast-ICA algorithm. Finally, the delayed triple correlation algorithm is presented to estimate the long and short PN codes from the composite code sequences based on the shift-and-add property of  $m$  sequence. Simulations show that the bit error rate of long and short codes sequences can be reduced to 0.1% when the SNR is above  $-2$  dB.

**Key words:** Pseudo-random Number (PN) code; Long and Short Codes Direct Sequence Code Division Multiple Access (LSC-DS-CDMA); Matrix completion; Blind source separation; Delayed Triple Correlation Function (TCF)

### 1 引言

直接序列扩频码分多址<sup>[1]</sup>(Direct Sequence Code Division Multiple Access, DS-CDMA)系统利用高速率的伪随机(Pseudo-Random Number, PN)码调制信息符号,具有低截获率、抗干扰能力强等

优点。DS-CDMA 可分为短码(Short Code, SC)和长码(Long Code, LC)扩频两种方式,对于 SC-DS-CDMA 信号,扩频码周期等于信息符号周期,非合作通信条件下扩频码的估计方法已有较多研究,主要有:子空间迭代算法<sup>[2]</sup>、多重信号分类算法<sup>[3]</sup>、基于张量的正则分解算法<sup>[4]</sup>和快速独立成分分析(Fast-ICA)<sup>[5]</sup>算法等。对于 LC-DS-CDMA 信号,一个扩频周期内包含多个信息符号,非合作通信条件下扩频码的估计方法主要有:特征值分解算法<sup>[6]</sup>、基于重叠分段<sup>[7]</sup>与优化分段<sup>[8]</sup>的 Fast-ICA 算法和基于贝叶斯模型的 RJ-MCMC 算法<sup>[9]</sup>等等。

收稿日期: 2015-09-23; 改回日期: 2016-02-26; 网络出版: 2016-04-26

\*通信作者: 李淼 limiao0825@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61571172)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61571172)

为了提高传输数据的定时恢复能力和保密性，数字扩频通信系统中，利用长伪码在比特级对短码扩频信号进行同步加扰<sup>[10]</sup>，构成 LSC-DSSS(Long and Short Codes Direct Sequence Spread Spectrum) 信号，长码加扰是对数据的随机化处理。非合作通信条件下，长短伪码的估计是完成此类信号解扰和解扩的关键，现阶段主要是基于  $m$  序列三阶相关函数(Triple Correlation Function, TCF)特性，在具备长扰码备选集的基础上利用三阶相关法实现了长扰码识别<sup>[11]</sup>，对信号巧妙分段估计出长扰码初始相位，完成信号的盲解扩<sup>[12]</sup>，基于三阶相关共同峰同时估计长短伪码本原多项式<sup>[13]</sup>，但是上述方法都是针对单用户的 LSC-DSSS 信号。对于 LSC-DS-CDMA 信号，信号结构更为复杂，各个用户的长短伪码盲估计难度很大，关于此类信号的研究成果还未见公开报道。

本文根据 LSC-DS-CDMA、LC-DS-CDMA 和 SC-DS-CDMA 信号结构的特点，首先将 LSC-DS-CDMA 信号构建为缺失部分观测点的 SC-DS-CDMA 信号，根据矩阵填充(Matrix Completion, MC)理论<sup>[14,15]</sup>，利用奇异值阈值<sup>[16-18]</sup>(Singular Value Thresholding, SVT)算法估计各个用户的复合码子空间，然后利用 Fast-ICA 算法<sup>[5]</sup>估计出各个用户的复合码序列，最后对复合码序列利用延迟三阶相关函数(TCF)法，分别估计出各个用户的长短伪码序列。

## 2 信号模型

假设 LSC-DS-CDMA 信号已经过载波恢复、符号同步和根升余弦滤波处理，各用户扩频码与扰码码片速率相等，信息符号周期与扩频码周期相等。将接收到的基带信号以码片速率采样，则接收端基带  $K$  用户 LSC-DS-CDMA 信号采样值可表示为<sup>[11]</sup>

$$y(i) = \sum_{k=1}^K A_k d_k(i) b_k(i) c_k(i) + v(i), \quad i = 0, 1, \dots, L-1 \quad (1)$$

式中， $A_k$ 、 $d_k(i)$ 、 $b_k(i)$ 和 $c_k(i)$ 分别表示第  $k$  个用户信号的幅度、信息码、短扩频码和长扰码的采样值；扩频码周期(扩频增益)和扰码周期分别为  $G$  和  $N$ ；各用户的信息码元序列服从独立同分布，且各用户之间相互独立； $v(i)$ 表示与有用信号独立、方差为  $\sigma^2$  的零均值高斯白噪声序列； $L$ 为接收信号观测样本长度，且假定  $L = JN$ ， $J$ 为正整数；每个用户均含有  $M = \lfloor L/G \rfloor$  个信息码元， $\lfloor x \rfloor$ 表示上取整。另外，本文假设长扰码周期  $N$ 、扩频码周期  $G$  和用户个数  $K$  已知或被事先估计得到。

将长短伪码构成的长度为  $N$  的复合码视为特殊长码，则  $K$  用户 LSC-DS-CDMA 信号可以视为  $K$  用

户 LC-DS-CDMA 信号，因此式(1)可等价表示为

$$y(i) = \sum_{k=1}^K A_k \left( \sum_{m=0}^M d_k(i) q(i - mG) \sum_{j=0}^J s_k(i - jN) \right) + v(i) \\ = x(i) + v(i), \quad i = 0, 1, \dots, L-1 \quad (2)$$

其中， $s_k(n) = b_k(n)c_k(n)$  ( $n = 0, 1, \dots, N-1$ )表示第  $k$  个用户的复合码序列； $x(i)$ 表示有用信号； $q(i) = \begin{cases} 1, & 0 \leq i < G \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$ 。

在等效 LC-DS-CDMA 信号基础上，假定存在一个含有相同复合码序列与信息码序列、扩频增益为  $N$  的  $K$  用户 SC-DS-CDMA 信号  $\tilde{y}(i)$ ，则  $\tilde{y}(i)$  如式(3)所示。

$$\tilde{y}(i) = \sum_{k=1}^K A_k \left( \sum_{m=0}^M d_k(i) q(i - mN) \sum_{j=0}^J s_k(i - jN) \right) + \tilde{v}(i) \\ = \tilde{x}(i) + \tilde{v}(i), \quad i = 0, 1, \dots, \tilde{L}-1 \quad (3)$$

其中， $\tilde{L} = MN$ 。 $\tilde{y}(i)$ 可表示为  $N \times M$  维的矩阵形式：

$$\tilde{\mathbf{Y}} = \mathbf{SAD} + \tilde{\mathbf{V}} \quad (4)$$

其中，

$$\mathbf{S} = [s_1 \ s_2 \ \dots \ s_K] \\ s_k = [s_k(0) \ s_k(1) \ \dots \ s_k(N-1)]^T \\ \mathbf{D} = [d_1 \ d_2 \ \dots \ d_K] \\ d_k = [d_k(0) \ d_k(1) \ \dots \ d_k(M-1)] \\ \mathbf{A} = \text{diag}(A_1, A_2, \dots, A_K)$$

其中， $\tilde{\mathbf{V}}$ 为  $N \times M$  维高斯白噪声矩阵， $\mathbf{S}$ 为复合码矩阵。

根据  $\{y(i)\}_{i=0}^{L-1}$  与  $\{\tilde{y}(i)\}_{i=0}^{\tilde{L}-1}$  对应关系，不难看出矩阵  $\tilde{\mathbf{Y}}$  的元素取值为

$$\tilde{\mathbf{Y}}_{(i)_{N+1} \lfloor i/N \rfloor + 1} = \tilde{y}(i), \quad i = 0, 1, \dots, \tilde{L}-1 \quad (5)$$

$$\mathbf{Y}_{(i)_{N+1} \lfloor i/G \rfloor + 1} = y(i), \quad i = 0, 1, \dots, \tilde{L}-1 \quad (6)$$

其中， $(i)_N$ 表示  $i$  对模  $N$  求余运算， $\lfloor x \rfloor$ 表示下取整； $\mathbf{Y}$ 为  $\tilde{\mathbf{Y}}$  每一列缺失了约  $N - G$  个特定位置元素的缺失矩阵。

显然，接收信号  $\{y(i)\}_{i=0}^L$  是  $\{\tilde{y}(i)\}_{i=0}^{\tilde{L}}$  中的部分样本，其余部分视为缺失。因此可将  $K$  用户 LSC-DS-CDMA 信号建模为缺失矩阵的数学模型，如式(7)所示：

$$\mathbf{Y} = \tilde{\mathbf{Y}} \odot \mathbf{W} \quad (7)$$

其中， $\mathbf{W}$ 为  $N \times M$  维的矩阵，且  $\mathbf{W}_{(i)_{N+1} \lfloor i/G \rfloor + 1} = 1$ ，其余位置元素为 0 (表示缺失点)； $\odot$ 表示矩阵点乘运算；将矩阵  $\mathbf{W}$  的非零元素(表示观测点)的下标集合记为  $\Omega$ 。

### 3 基于矩阵填充的复合码盲估计

从有缺失点的矩阵中恢复出完整矩阵, 为矩阵填充(MC)问题<sup>[13,14]</sup>。利用采样或观测得到的矩阵元素, 在一定条件下合理准确地填充缺失元素的问题可表示为如式(8)的优化问题:

$$\left. \begin{aligned} \min \quad & \text{rank}(\mathbf{X}) \\ \text{s.t.} \quad & P_{\Omega}(\mathbf{X}) = P_{\Omega}(\mathbf{Y}) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中  $\mathbf{X}$  和  $\mathbf{Y}$  分别为待填充的完整矩阵和观测到的缺失矩阵;  $P_{\Omega}$  为投影算子(具体表示缺失元素投影为0)。

奇异值阈值(SVT)算法是求解 MC 问题的一种有效方法, 其关键是将上述基本模型转化为如式(9)的近似问题:

$$\left. \begin{aligned} \min \quad & \tau \|\mathbf{X}\|_* + 0.5 \|\mathbf{X}\|_F^2 \\ \text{s.t.} \quad & \|\mathbf{X} \odot \mathbf{W} - \mathbf{Y}\|^2 \leq \varepsilon_0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中,  $\tau$  为常数,  $\|\mathbf{X}\|_*$  表示矩阵  $\mathbf{X}$  的核范数, 即为  $\mathbf{X}$  的奇异值之和,  $\|\mathbf{X}\|_F$  表示矩阵  $\mathbf{X}$  的 F 范数, 且当  $\tau \rightarrow \infty$  时, 该模型的最优解  $\hat{\mathbf{X}}$  收敛于优化问题式(8)的最优解。

若式(4)中矩阵  $\tilde{\mathbf{Y}}$  最大的  $K$  个奇异值对应的左奇异特征向量组成的矩阵为  $\mathbf{U}_s \in R^{N \times K}$ , 则  $\mathbf{U}_s \in R^{N \times K}$  的列向量张成的子空间与  $\mathbf{S}$  的列向量张成的子空间属于同一个子空间, 即它们之间存在线性变换的关系, 假设线性变换为  $\mathbf{T}$ , 则:

$$\mathbf{U}_s = \mathbf{T}\mathbf{S} \quad (10)$$

式(10)相当于一个线性混合模型。假设利用 Fast-ICA 算法<sup>[5]</sup>由  $\mathbf{U}_s$  盲分离出的信号为  $\mathbf{S}_f$ , 对  $\mathbf{S}_f$  进行符号运算就可估计出复合码矩阵, 即

$$\hat{\mathbf{S}} = \text{sign}(\mathbf{S}_f) \quad (11)$$

因此, 复合码矩阵  $\mathbf{S}$  的盲估计就转化为利用缺失矩阵  $\mathbf{Y}$  估计完整矩阵  $\tilde{\mathbf{Y}}$  的左奇异特征向量  $\mathbf{U}_s$ , 而这是典型的矩阵填充问题, 利用 SVT 算法<sup>[16-18]</sup>求解得到式(9)的  $\hat{\mathbf{X}}$  的左奇异特征向量与  $\mathbf{U}_s$  是等价的。所以可得基于 SVT 和 Fast-ICA 的复合码盲估计算法步骤如下:

(1) 给定  $\tau, \delta, \varepsilon$ , 初始化  $\mathbf{Z}^0 \in R^{N \times M}$ ;

(2) 计算解矩阵  $\mathbf{X}^j = F_{\tau}(\mathbf{Z}^{j-1})$ ;

(3) 由  $\mathbf{Z}^j = \mathbf{Z}^{j-1} + \delta(\mathbf{Y} - \mathbf{X}^j \odot \mathbf{W})$  更新乘子矩阵  $\mathbf{Z}^j$ ;

(4) 若  $\frac{\|\mathbf{Y} - \mathbf{X}^j \odot \mathbf{W}\|_F^2}{\|\mathbf{Y}\|_F^2} > \varepsilon$ , 则  $j = j + 1$ , 返回

步骤(2); 反之, 得到估计值  $\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{X}^j$ 。对  $\hat{\mathbf{X}}$  进行奇异值分解即可得到复合码序列子空间  $\mathbf{U}_s$  的估计值

$\hat{\mathbf{U}}_s$ ;

(5) 利用 Fast-ICA 算法和式(11)估计得到复合码矩阵  $\hat{\mathbf{S}}$ 。

步骤(2)中的  $F_{\tau}(\mathbf{X})$  为奇异值阈值算子,  $F_{\tau}(\mathbf{X})$  定义为

$$F_{\tau}(\mathbf{X}) = \sum_{n=1}^{\tau} \lambda_n \mathbf{U}_z(n) \mathbf{V}_z^H(n) \quad (12)$$

其中,  $\lambda_n (n = 1, 2, \dots, N)$  为矩阵  $\mathbf{Z}$  按降序排列的奇异值, 且满足  $\lambda_{\tau} \leq \tau \leq \lambda_{\tau-1}$ ;  $\mathbf{U}_z(n)$  和  $\mathbf{V}_z(n)$  分别表示矩阵  $\mathbf{Z}$  的左奇异特征向量和右奇异特征向量的第  $n$  列。

### 4 基于延迟三阶相关的长短伪码盲估计

上节估计得到的复合码矩阵  $\hat{\mathbf{S}}$  的各列  $\hat{s}_k(n)$ ,  $n = 0, 1, \dots, N-1$  是各个用户对应的复合码序列, 对于第  $k$  个用户, 其复合码为  $\hat{s}_k(n) = \hat{b}_k(n)\hat{c}_k(n)$ , 本节讨论如何由  $\{\hat{s}_k(n)\}_{n=0}^{N-1}$  得到长短码的估计  $\{\hat{c}_k(n)\}_{n=0}^{N-1}$  和  $\{\hat{b}_k(n)\}_{n=0}^{G-1}$ 。LSC-DS-CDMA 信号的各用户一般采用长周期  $m$  序列作为扰码, 而扩频码可以选择  $m$  序列、Gold 序列或者 Walsh 码等。由于  $\hat{b}_k(n)$  和  $\hat{c}_k(n)$  相互独立, 所以复合码  $\hat{s}_k(n)$  的 TCF 为

$$\begin{aligned} C_{\hat{s}_k}(p, q) &= E[\hat{s}_k(n)\hat{s}_k(n+p)\hat{s}_k(n+q)] \\ &= C_{\hat{b}_k}(p, q) \cdot C_{\hat{c}_k}(p, q) \end{aligned} \quad (13)$$

其中  $C_{\hat{b}_k}(p, q)$ ,  $C_{\hat{c}_k}(p, q)$  分别表示第  $k$  个用户的短码和长码的三阶相关函数。

$$C_{\hat{b}_k}(p, q) = E[\hat{b}_k(n)\hat{b}_k(n+p)\hat{b}_k(n+q)] \quad (14)$$

$$C_{\hat{c}_k}(p, q) = E[\hat{c}_k(n)\hat{c}_k(n+p)\hat{c}_k(n+q)] \quad (15)$$

为了消除短扩频码对长扰码 TCF 的影响, 将估计得到的复合码  $\hat{s}_k(n)$  循环左移  $G$  比特位与原复合码相乘, 即

$$\begin{aligned} \hat{a}_k(n) &= \hat{s}_k(n)\hat{s}_k(n+G) \\ &= \hat{b}_k(n \bmod N)\hat{c}_k(n) \cdot \hat{b}_k((n+G) \bmod N)\hat{c}_k(n+G) \\ &= \hat{c}_k(n)\hat{c}_k(n+G) \end{aligned} \quad (16)$$

由  $m$  序列的移位相加特性<sup>[1]</sup>可知:

$$\hat{c}_k(n)\hat{c}_k(n+G) = \hat{c}_k(n+G_k) \quad (17)$$

则长扰码序列  $\{\hat{c}_k(n)\}_{n=0}^{N-1}$  为  $\{\hat{a}_k(n)\}_{n=0}^{N-1}$  循环右移  $G_k$  比特位得到:

$$\hat{c}_k(n) = \hat{a}_k(n - G_k), \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (18)$$

因此, 要估计得到长码序列  $\{\hat{c}_k(n)\}_{n=0}^{N-1}$  必须要先估计出  $G_k$ 。

根据  $m$  序列的 TCF 峰值特性可知, 若  $\{\hat{c}_k(n)\}_{n=0}^{N-1}$  满足式(17), 则  $C_{\hat{c}_k}(p, q)$  在  $(G, G_k)$  处存在峰值。周期为  $N$  的长码  $m$  序列  $\{\hat{a}_k(n)\}_{n=0}^{N-1}$  和  $\{\hat{c}_k(n)\}_{n=0}^{N-1}$  均基于伽罗华域 GF(2) 上的同一本原多

项式  $f_{c_k}(x)$ ，区别仅在于其初始相位不同，因此它们具有相同的 TCF 峰值点，即  $C_{\hat{a}_k}(p, q)$  在  $(G, \Gamma_k)$  上也存在峰值，其中，

$$C_{\hat{a}_k}(p, q) = E[\hat{a}_k(n)\hat{a}_k(n+p)\hat{a}_k(n+q)] \quad (19)$$

理论上  $C_{\hat{a}_k}(p, q)$  在  $(N-1) \times (N-1)$  范围内的每行每列上均存在一个峰值点，且在峰值点处的取值为 1，所以  $\Gamma_k$  的取值满足式(20)，且是唯一的。

$$\Gamma_k = \{q | C_{\hat{a}_k}(p, q) = 1, p = G\} \quad (20)$$

考虑到实际中存在误差干扰， $\Gamma_k$  的估计可修改为

$$\Gamma_k = \{q | C_{\hat{a}_k}(p, q) = \max\{C_{\hat{a}_k}(p, q)\}, p = G\} \quad (21)$$

所以由式(16)、式(21)和式(18)可以估计得到长扰码序列  $\{\hat{c}_k(n)\}_{n=0}^{N-1}$ 。

短扩频码序列的估计为

$$\hat{b}_k(g) = \hat{s}_k(g)\hat{c}_k(g), \quad g = 0, 1, \dots, G-1 \quad (22)$$

综上所述可得，本文提出的基于 MC 和 TCF 的 LSC-DS-CDMA 信号的长短伪码盲估计算法主要步骤如下：

- (1)由接收信号  $\{y(i)\}_{i=0}^{L-1}$ ，根据式(6)和式(7)构造  $N \times M$  维的缺失矩阵  $\mathbf{Y}$ ；
- (2)由第 3 节的基于 SVT 和 Fast-ICA 的复合码盲估计算法估计得到复合码矩阵  $\hat{\mathbf{S}}$ ；
- (3)利用式(16)、式(19)和式(21)估计  $\Gamma_k$ ，再由式(18)得到长码估计  $\{\hat{c}_k(n)\}_{n=0}^{N-1}$ ，根据式(22)估计扩频短码  $\{\hat{b}_k(g)\}_{g=0}^{G-1}$ 。

### 5 算法仿真与性能分析

仿真实验中，信噪比定义为  $\text{SNR} = 10 \lg(\sigma_x^2 / \sigma_v^2)$ ， $\sigma_x^2$  和  $\sigma_v^2$  分别表示式(2)中 有用信号和噪声的方差；LSC-DS-CDMA 信号各个用户的信息符号是随机产生的  $\{\pm 1\}$ ，各用户信号幅值  $A_k = 1$ ，长扰码采用周期  $N = 1023$  的 m 序列，短扩频码采用 Walsh 码，

接收信号长度为  $L = 100N$ 。下文给出的结果是 100 次 Monte-Carlo 仿真平均。由缺失矩阵  $\mathbf{Y}$  填充得到的矩阵  $\hat{\mathbf{X}}$  与完整矩阵  $\tilde{\mathbf{Y}}$  的填充误差如式(23)所示：

$$\rho = \frac{\|\tilde{\mathbf{Y}} - \hat{\mathbf{X}}\|_F^2}{\|\tilde{\mathbf{Y}}\|_F^2} \quad (23)$$

**仿真 1 多用户复合码估计性能** SVT 算法参数设定<sup>[16,17]</sup>： $\tau = 5M$ ， $\delta = 1.2N/G$ ， $\varepsilon = 10^{-4}$ 。将多用户复合码估计的正确率作为算法性能评价指标。

(1)复合码估计正确率与用户个数  $K$  的关系：扩频码周期  $G = 128$ 。当用户个数  $K$  分别为 2、3 和 5 时，填充误差  $\rho$  随信噪比的变化曲线如图 1 所示，本文提出的复合码估计正确率随信噪比的变化曲线如图 2 所示。由图 2 可知：在一定信噪比条件下，填充误差  $\rho$  随用户个数增加稍有增大，能估计出所有用户复合码的正确率随用户个数增加而降低。

(2)复合码估计正确率与扩频码周期  $G$  的关系：用户个数  $K = 3$ ，当 Walsh 码周期  $G$  分别为 128 和 256 时，填充误差  $\rho$  随信噪比的变化曲线如图 3 所示，复合码估计正确率随信噪比的变化曲线如图 4 所示。由图 4 可知：在信噪比一定的条件下，填充误差  $\rho$  随着扩频码周期长度增加而略有减小，复合码估计正确率随着扩频码周期长度增加而提高，这是因为在长扰码周期长度一定的条件下，扩频码周期长度越长，矩阵  $\mathbf{Y}$  缺失点越少，利用 SVT 算法填充矩阵的效果越好，与完整矩阵  $\tilde{\mathbf{Y}}$  的误差也越小。

#### 仿真 2 本文算法对多伪码估计性能

(1)多用户长短伪码估计：仿真中，短码周期  $G = 128$ ，用户个数  $K = 3$ 。本文算法对长码和短码序列估计的平均误码率曲线如图 5 所示。由图 5 可知：信噪比小于 -1 dB 时，短码估计性能比长码的差；长短伪码平均误码率低于 0.1% 所需要的信噪比约为 -2 dB。

(2)算法性能对比：目前无公开报道关于 LSC-DS-CDMA 信号的长短多伪码盲估计算法，为

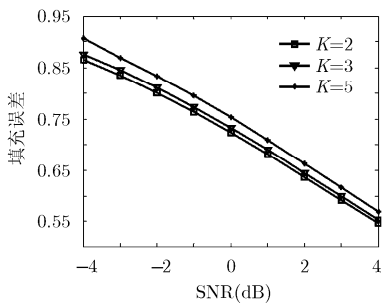


图 1 填充误差与用户个数的关系

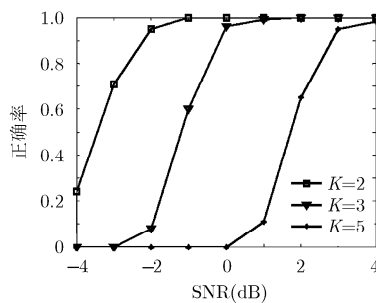


图 2 复合码估计正确率与用户个数的关系

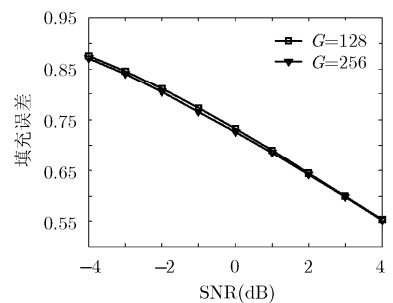


图 3 填充误差与扩频码周期的关系

了进一步说明算法性能, 比较本文算法与文献[8]算法针对 LSC-DS-CDMA 信号的伪码估计性能。仿真中, 短码周期  $G = 256$ , 用户个数  $K = 3$ 。由于文献[8]算法只能估计出本文信号模型的复合码, 故比较两种算法复合码估计的正确率, 结果如图 6 所示。由图 6 可见, 当信噪比大于  $-1.7$  dB 时, 本文算法性能比文献[8]算法好得多, 但信噪比小于  $-1.7$  dB 时, 文献[8]算法性能要优于本文算法。文献[8]直接由信号利用 Fast-ICA 法估计伪码, 而本文先利用 MC 法估计复合码子空间  $U_s$ , 然后利用 Fast-ICA 法由  $U_s$  估计得到伪码, 当信噪比较低时, 估计得到的  $U_s$  误差较大, 因此本文算法性能不如文献[8], 随着信噪比增加, 本文算法性能显著提高。文献[8]算法性能

提高十分缓慢, 这是因为文献[8]算法中信号分段和伪码片段拼接带来的误差积累十分严重。因此, 由文献[8]估计得到的复合码再利用本文的延迟相关法分别估计出的长短伪码的性能不如本文算法。

## 6 结论

本文将 LSC-DS-CDMA 信号建模为缺失部分观测点的 SC-DS-CDMA 信号, 利用奇异值阈值 (SVT) 算法和 Fast-ICA 算法估计各个用户的复合码序列, 再利用延迟三阶相关法分别估计出各个用户的长短伪码序列。仿真表明, 信噪比高于  $-0.5$  dB 时, 复合码估计的正确率可达到 90% 以上; 信噪比高于  $-2$  dB 时, 长短伪码估计平均误码率低于 0.1%。

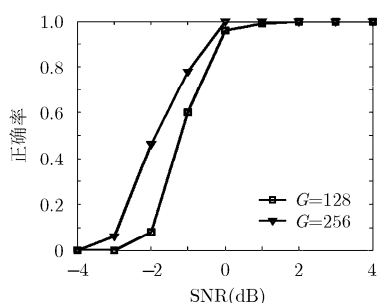


图 4 复合码估计正确率与扩频码周期的关系

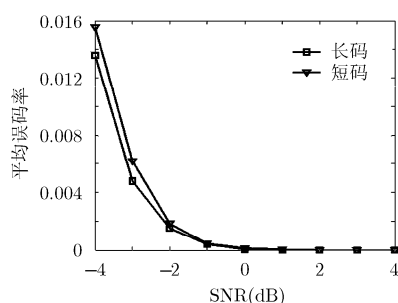


图 5 长短伪码估计性能

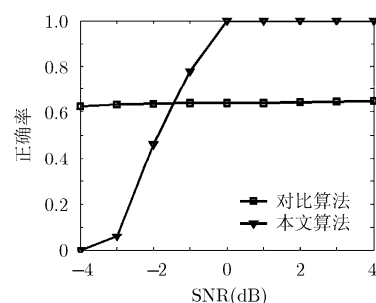


图 6 算法性能对比

## 参考文献

- [1] 曾兴雯. 扩展频谱通信及其多址技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: 217-227.  
ZENG Xingwen. Spread Spectrum Communication and Multiple Access Technology[M]. Xi'an: Xi'an Electronic Science & Technology University Press, 2004: 217-227.
- [2] JOUTSENSALO J. Semi-blind CDMA code estimation in downlink[C]. 48th IEEE Vehicular Technology Conference, Ottawa, 1998: 1356-1360. doi: 10.1109/VETECC.1998.686472
- [3] QIU P Y, HUANG Z T, JIANG W L, et al. Blind multiuser spreading sequences estimation algorithm for the direct-sequence code division multiple access signals[J]. *IET Signal Processing*, 2010, 4(5): 465-478. doi: 10.1049/iet-spr.2008.0254.
- [4] SIDIROPOULOS N D, GIANNAKIS G B, and BRO R. Blind PARAFAC receivers for DS-CDMA systems[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2000, 48(3): 810-823. doi: 10.1109/78.824675.
- [5] 付卫红, 杨小牛, 刘乃安. 基于盲源分离的 CDMA 多用户检测与伪码估计[J]. 电子学报, 2008, 36(7): 1319-1323.  
FU Weihong, YANG Xiaoniu, and LIU Naian. Multi-user detection and chip sequence estimation for CDMA system based on the blind source separation[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(7): 1319-1323.
- [6] 张天骐, 周圣, 高丽, 等. 基于模糊酉矩阵 TD-SCDMA 突发信号组合码的盲估计[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(6): 1357-1364. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01007.  
ZHANG Tianqi, ZHOU Sheng, GAO Li, et al. Blind estimation of the combination code of TD-SCDMA burst signal based on fuzzy unitary matrix[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(6): 1357-1364. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01007.
- [7] 陆凤波, 黄知涛, 姜文利. 基于 Fast-ICA 的 CDMA 信号扩频序列盲估计及性能分析[J]. 通信学报, 2011, 32(8): 136-142.  
LU Fengbo, HUANG Zhitao, and JIANG Wenli. Blind estimation of spreading sequence of CDMA signals based on Fast-ICA and performance analysis[J]. *Journal on Communications*, 2011, 32(8): 136-142.
- [8] 任啸天, 徐晖, 黄知涛, 等. 基于 Fast-ICA 的 CDMA 信号扩频序列优化盲估计[J]. 电子学报, 2012, 40(8): 1532-1538. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.08.006.  
REN Xiaotian, XU Hui, HUANG Zhitao, et al. Fast-ICA based optimize blind estimation of spreading sequence of CDMA signals[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(8): 1532-1538. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.08.006.
- [9] 张立民, 钟兆根, 武恒州. 基于贝叶斯模型的长码 DS-CDMA 信号扩频码与信息序列联合估计[J]. 航空学报, 2013, 34(5):

- 1191-1203. doi: 10.7527/S1000-6893.2013.0205.
- ZHANG Limin, ZHONG Zhaogen, and WU Hengzhou. Joint estimation of spreading codes and information sequences for long codes DS-CDMA signals based on Bayesian model[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(5): 1191-1203. doi: 10.7527/S1000-6893.2013.0205.
- [10] 张旻, 吕全通, 朱宇轩. 基于线性分组码的自同步扰码盲识别[J]. *应用科学学报*, 2015, 33(2): 178-186. doi: 10.3969/j.issn.0255-8297.2015.02.007.
- ZHANG Min, LÜ Quantong, and ZHU Yuxuan. Blind recognition of self-synchronized scrambler based on linear block code[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2015, 33(2): 178-186. doi: 10.3969/j.issn.0255-8297.2015.02.007.
- [11] 赵知劲, 顾晓炜, 沈雷. 非周期长码直扩信号的长扰码识别[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(8): 1792-1797. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01454.
- ZHAO Zhijin, GU Xiaowei, and SHEN Lei. An identification method of long pseudo-random code sequence in non-periodic direct sequence spread spectral signals[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(8): 1792-1797. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01454.
- [12] 赵知劲, 顾晓炜, 沈雷, 等. 非周期长码直扩信号的盲解扩[J]. *信号处理*, 2014, 30(5): 511-516.
- ZHAO Zhijin, GU Xiaowei, SHEN Lei, et al. Blind despreading of non-periodic long code direct-sequence spread-spectrum signals[J]. *Journal of Signal Processing*, 2014, 30(5): 511-516.
- [13] 赵知劲, 顾晓炜, 沈雷, 等. 非周期长码直扩信号的伪随机码盲估计[J]. *通信学报*, 2015, 36(5): 2015121-1-2015121-8. doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2015121.
- ZHAO Zhijin, GU Xiaowei, SHEN Lei, et al. Blind estimation of pseudo-random codes in non-periodic long code direct-sequence spread-spectrum signals[J]. *Journal on Communications*, 2015, 36(5): 2015121-1-2015121-8. doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2015121.
- [14] 彭义刚, 索津莉, 戴琼海, 等. 从压缩传感到低秩矩阵恢复: 理论与应用[J]. *自动化学报*, 2013, 39(7): 981-994. doi: 10.3724/SP.J.1004.2013.00981.
- PENG Yigang, SUO Jinli, DAI Haiqiong, et al. From compressed sensing to low-rank matrix recovery: theory and applications[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(7): 981-994. doi: 10.3724/SP.J.1004.2013.00981.
- [15] EMMANUEL C and RECHT B. Exact matrix completion via convex optimization[J]. *Foundations of Computational Mathematics*, 2009, 9(6): 717-772. doi: 10.1007/s10208-009-9045-5.
- [16] CAI J F and CANDES E J. A singular value thresholding algorithm for matrix completion[J]. *SIAM Journal on Optimization*, 2008, 20(4): 1956-1982. doi: 10.1137/080738970.
- [17] 陈峰峰. 奇异值阈值算法在 Netflix 问题中的应用研究[D]. [博士学位论文], 清华大学, 2011.
- CHEN Fengfeng. A study of the application of SVT algorithm in Netflix problem[D]. [Ph.D. dissertation], Tsinghua University, 2011.
- [18] 赵玉娟, 郑宝玉, 陈守宁. 矩阵填充及其在信号处理中的应用[J]. *信号处理*, 2015, 31(4): 423-436.
- ZHAO Yujuan, ZHENG Baoyu, and CHEN Shouning. Matrix completion and its application in signal processing[J]. *Journal of Signal Processing*, 2015, 31(4): 423-436.
- 赵知劲: 女, 1959年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为信号处理、软件无线电技术等.
- 李 淼: 女, 1990年生, 硕士生, 研究方向为软件无线电.
- 尚俊娜: 女, 1979年生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为信号与信息处理.