

## 同/异步短码DS-CDMA信号伪码序列及信息序列盲估计

周 杨\* 张天骐

(重庆邮电大学信号与信息处理重庆市重点实验室 重庆 400065)

**摘 要:** 针对传统单通道异步直接序列码分多址(DS-CDMA)信号信息序列及伪码序列(PN)难以估计的问题, 该文提出一种基于平行因子(PARAFAC)的多通道盲估计方法。该方法首先将信号建模为多通道接收模型, 然后将观测数据矩阵等效为平行因子模型, 最后使用迭代最小二乘算法对平行因子进行低秩分解, 进一步完成对DS-CDMA信号各用户的信息序列及伪码序列进行估计。仿真实验表明, 该方法不仅能有效地对同步、异步短码DS-CDMA信号的伪码序列及信息序列进行估计, 而且能在通道数为6、信噪比(SNR)为-10 dB的条件下, 实现10个用户伪码序列的有效估计。

**关键词:** 直接序列码分多址信号; 平行因子; 信息序列; 伪码序列

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)07-1540-08

DOI: 10.11999/JEIT180812

## Blind Estimation of the Pseudo Noise Sequence and Information Sequence for Short Code Synchronous and Asynchronous DS-CDMA Signal

ZHOU Yang ZHANG Tianqi

(Chongqing Key Laboratory of Signal and Information Processing, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** For the problem of Direct Sequence-Code Division Multiple Access (DS-CDMA) signal in traditional asynchronous single-channel, including blind estimation of the Pseudo-Noise (PN) sequence and information sequence, a method using multi-channel synchronous and asynchronous based on PARAllel FACTor (PARAFAC) is proposed. Firstly, the signal is modeled as a multi-channel receiving model, then the observed data matrix is equivalent to a factor model. Finally, the iterative least squares algorithm is applied to decomposing the parallel factor, and the information sequence and PN sequences of DS-CDMA signals are further estimated. The simulation results show that the proposed method can effectively estimate the PN sequence and information sequence of the short code DS-CDMA signal, and the estimation of 6 user PN sequences can be realized under the condition that the number of channels is 10 and the Signal-to-Noise Ratio (SNR) is -10 dB.

**Key words:** Direct Sequence-Code Division Multiple Access (DS-CDMA) signal; PARAllel FACTor (PARAFAC); Information sequence; Pseudo Noise (PN) sequence

### 1 引言

直接序列码分多址(Direct Sequence-Code

Division Multiple Access, DS-CDMA)信号因具有隐蔽性好、抗干扰、保密性强等优点被广泛地应用于军事和民用通信<sup>[1]</sup>。然而在非协作扩频通信系统中, 由于接收方未知晓信号调制所用的扩频码序列, 即使截获到DS-CDMA信号, 也难以获取信号中传输的有用信息。因此, 对DS-CDMA信号的盲解扩问题成为通信领域研究的重点和热点。

目前, 针对DS-CDMA信号的研究主要集中在短码调制的DS-CDMA信号, 长码调制的DS-CDMA信号研究较少。如: 基于特征值分解或奇异值分解的方法, 基于信号子空间的方法<sup>[2-4]</sup>, 基于3阶相关函数的方法<sup>[5,6]</sup>, 基于主分量神经网络的方法<sup>[7]</sup>以及

收稿日期: 2018-08-17; 改回日期: 2019-02-27; 网络出版: 2019-03-18

\*通信作者: 周杨 zhouyang@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61671095, 61371164), 信号与信息处理重庆市市级重点实验室建设项目(CSTC2009CA2003), 重庆市杰出青年基金(CSTC2011jjjq40002)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61671095, 61371164), The Project of Key Laboratory of Signal and Information Processing of Chongqing (CSTC2009CA2003), The Chongqing Distinguished Youth Foundation (CSTC2011jjjq40002)

盲源分离的方法<sup>[8,9]</sup>。其中,文献[2]使用特征值分解法,但当信号中用户功率相近或相等时,该方法不能够准确地提取出主特征向量,从而影响各用户伪码序列估计的正确率。文献[5,6]针对长短码DS-CDMA信号,提出基于矩阵填充和3阶相关的盲估计方法,但是该方法只能估计 $m$ 序列,无法对gold, M序列等其他伪随机编码序列进行估计,具有一定的局限性。文献[7]使用多主分量神经网络法,在一定程度上克服了文献[2]中因批处理数据矩阵造成的计算复杂度高、内存开销大的问题。文献[8]利用等效盲源分离的模型及伪码序列与信息序列相互独立的性质对各用户的伪码序列进行了估计。然而,以上方法都是针对较为理想情况下的同步DS-CDMA信号伪码序列盲估计,而对于更为一般情况的异步DS-CDMA信号伪码序列的盲估计研究甚少,文献[9]在文献[8]的基础上将盲源分离的方法拓展至盲估计同步、异步短码DS-CDMA信号的信息序列及伪码序列,但是二者在对信号进行盲源分离时,都需要进行信号的白化处理。由于采用了特征分解的技术对信号进行白化处理,造成低信噪比情况下无法正确提取主分量,使得后续的盲源分离准确率较低,而且估计的用户数容限值较少。

针对以上对同步、异步短码DS-CDMA信号盲解扩的问题,本文提出一种基于平行因子的多通道同步、异步短码DS-CDMA信号信息序列及伪码序列盲估计方法。首先将同步、异步短码DS-CDMA信号建模为多通道接收模型,然后将观测数据矩阵等效为平行因子(PARAllel FACtor, PARAFAC)模型,最后交替使用迭代最小二乘算法对平行因子进行低秩分解以完成对各用户信息序列和伪码序列的盲估计。

## 2 同/异步短码DS-CDMA信号多通道接收模型

本文所采用的DS-CDMA信号多通道接收模型<sup>[10]</sup>如图1所示,假设在二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)调制的DS-CDMA系统模型中存在 $U$ 个用户、 $R$ 个接收通道,且各用户之间、各接收通道之间相互独立。则第 $r$ 个通道接收的基带信号表达式为

$$\begin{aligned} x_r(t) &= \sum_{u=1}^U a_{r,u} \bar{A}_u s_u(t - \tau_u) + w_r(t) \\ &= \sum_{u=1}^U a_{r,u} \bar{A}_u \sum_{m=0}^{M-1} b_{u,m} h_u(t - mT_b - \tau_u) \\ &\quad \cdot \sum_{n=0}^{N-1} p_{u,n} q_u(t - nT_p - \tau_u) + w_r(t) \end{aligned} \quad (1)$$

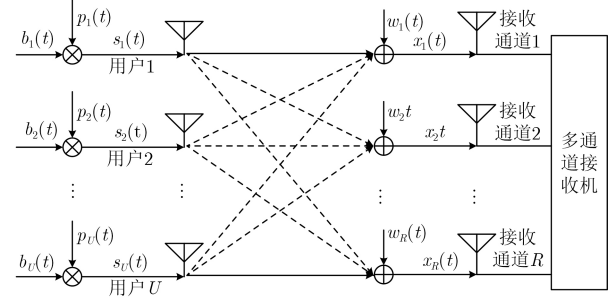


图1 短码DS-CDMA信号多通道接收模型

其中,  $a_{r,u}$ ,  $\bar{A}_u$ ,  $\tau_u$ ,  $\{b_{u,m} = \pm 1\}_{m=0}^{M-1}$  和  $\{p_{u,n} = \pm 1\}_{n=0}^{N-1}$  分别表示第 $r$ 个接收通道对于第 $u$ 个用户的接收增益、信号幅度、失步时间(传输时延)、信息序列和伪码序列;  $T_b$ 和 $T_p$ 分别表示信息码元的宽度和伪码码片的宽度,此时有 $T_b = NT_p$ ,  $N$ 表示伪码序列的长度;  $h_u(t)$ ,  $q_u(t)$ 分别表示矩形脉冲函数;  $w_r(t)$ 表示接收通道 $r$ 中均值为0、方差为 $\sigma_w^2$ 的高斯白噪声。

不失一般性,假设信号等功率传输( $\bar{A}_u = 1$ )、伪码周期和伪码码片宽度已由文献[11]中的方法估计得到,现以伪码码片宽度 $T_p$ 对式(1)进行采样,可进一步得到信号的离散表达式

$$\begin{aligned} x_r(i) &= \sum_{u=1}^U a_{r,u} \sum_{m=0}^{M-1} b_{u,m} h_u(i - mN - \tau_u) \\ &\quad \cdot \sum_{n=0}^{N-1} p_{u,n} q_u(i - n - \tau_u) + w_r(i) \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $x_r(i) = x_r(iT_p)$ ,  $w_r(i) = w_r(iT_p)$ ,  $h_u(i) = h_u(iT_p)$ ,  $q_u(i) = q_u(iT_p)$ 。当 $U$ 个用户的失步时间 $\tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_U = 0$ 时,此时式(2)称为同步DS-CDMA信号;当 $U$ 个用户的失步时间互不相等时,此时式(2)称为异步DS-CDMA信号。

## 3 同/异步短码DS-CDMA信号盲解扩方法

### 3.1 同/异步短码DS-CDMA信号分段模型

本文在第2节给出了多通道接收的短码DS-CDMA信号模型,并根据失步时间的不同将信号分为同步和异步两种情况。由于同步短码DS-CDMA信号较为理想,易于处理,故对于同步短码DS-CDMA信号以单倍伪码周期进行分段,则同步短码DS-CDMA信号第 $r$ 个通道接收的 $m$ 段信号数据矩阵为

$$\mathbf{x}_{r,m} = (\mathbf{a}_r \odot \mathbf{P}) \mathbf{b}_m + \mathbf{w}_{r,m} \quad (3)$$

其中, “ $\odot$ ”表示对矩阵求外积,  $\mathbf{a}_r = [a_{r,1} \ a_{r,2} \ \dots \ a_{r,U}]$ ,  $\mathbf{P} = [\mathbf{p}_1 \ \mathbf{p}_2 \ \dots \ \mathbf{p}_U]$ ,  $\mathbf{p}_u = [p_{u,1} \ p_{u,2} \ \dots \ p_{u,N}]$ ,  $1 \leq u \leq U$ 。  $\mathbf{b}_m = [b_{1,m} \ b_{2,m} \ \dots \ b_{U,m}]^H$ ,  $\mathbf{n}_{r,m} = [n_{m,r,1} \ n_{m,r,2} \ \dots \ n_{m,r,N}]^H$ 。则由式(3)可得第

$r$  个通道接收的第  $m$  个信息符号所对应的第  $n$  个伪码码片的数据元素为

$$\bar{x}_{r,m,n} = \sum_{u=1}^U c_{u,n} a_{r,u} d_{u,m} + n_{r,m,n} \quad (4)$$

其中,  $c_{u,n}$  表示第  $u$  个用户所对应的第  $n$  个伪码码片,  $a_{r,u}$  表示第  $r$  个通道对应的第  $u$  个用户的接收增益,  $d_{u,m}$  表示第  $u$  个用户所对应的第  $m$  个信息符号。

对于异步短码DS-CDMA信号, 由于各用户的失步时间都不相同, 若采用单倍伪码周期对信号进行分段, 需要对估计出的伪码子序列进行拼接才能

完成对完整伪码序列的估计, 并且需要估计出各用户的失步时间才能完成拼接, 这不仅使得伪码序列估计的正确率降低而且各用户的失步时间在低信噪比下也难以准确估计。基于以上问题, 本文以2倍伪码周期、重叠1倍伪码周期的时间窗对异步短码DS-CDMA信号进行分段处理, 则异步短码DS-CDMA信号第  $r$  个接收通道的第  $m$  段分段信号为

$$\begin{aligned} \mathbf{x}'_{r,m} = & (\mathbf{a}_r \odot \mathbf{p}'_1) \mathbf{b}_{1,m} + (\mathbf{a}_r \odot \mathbf{p}'_2) \mathbf{b}_{2,m} \\ & + (\mathbf{a}_r \odot \mathbf{p}'_3) \mathbf{b}_{3,m} + \mathbf{w}'_{r,m} \end{aligned} \quad (5)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{p}_1 = [\mathbf{p}_1^1 \mathbf{p}_1^2 \cdots \mathbf{p}_1^U]_{2N \times U}, \quad \mathbf{p}_i^1 &= \left[ \frac{p_{i,\tau_i+1} \cdots p_{i,N}}{N - \tau_i} \frac{0 \cdots 0}{N + \tau_i} \right]_{2N \times 1}^H, 1 \leq i \leq U \\ \mathbf{p}_2 = [\mathbf{p}_2^1 \mathbf{p}_2^2 \cdots \mathbf{p}_2^U]_{2N \times U}, \quad \mathbf{p}_i^2 &= \left[ \frac{0 \cdots 0}{N - \tau_i} \frac{p_{i,1} \cdots p_{i,N}}{N} \frac{0 \cdots 0}{\tau_i} \right]_{2N \times 1}^H, 1 \leq i \leq U \\ \mathbf{p}_3 = [\mathbf{p}_3^1 \mathbf{p}_3^2 \cdots \mathbf{p}_3^U]_{2N \times U}, \quad \mathbf{p}_i^3 &= \left[ \frac{0 \cdots 0}{2N - \tau_i} \frac{p_{i,1} \cdots p_{i,\tau_i}}{\tau_i} \right]_{2N \times 1}^H, 1 \leq i \leq U \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\mathbf{b}_{1,m} = [b_{1,m} b_{2,m} \cdots b_{U,m}]_{U \times 1}^H, \mathbf{b}_{2,m} = [b_{1,m+1} b_{2,m+1} \cdots b_{U,m+1}]_{U \times 1}^H, \mathbf{b}_{3,m} = [b_{1,m+2} b_{2,m+2} \cdots b_{U,m+2}]_{U \times 1}^H \quad (7)$$

$$\mathbf{w}'_{r,m} = [w_{m,r,1} w_{m,r,2} \cdots w_{m,r,2N}]_{2N \times 1}^H \quad (8)$$

式(6)中,  $\mathbf{p}_{i,m}^1$ ,  $\mathbf{p}_{i,m}^2$  和  $\mathbf{p}_{i,m}^3$  分别表示各用户2倍伪码周期的左子序列、完整的伪码序列和伪码周期的右子序列, 且左、右子序列的长度由各用户失步时间  $\tau_i$  所决定。

令接收信号按照上述方法分成  $M$  段, 可进一步得到第  $r$  个通道的接收信号数据矩阵为

$$\bar{\mathbf{x}}'_{r,m,n} = \sum_{u=1}^U c'_{u,n} a'_{r,u} d'_{u,m} + n'_{r,m,n} \quad (9)$$

综上所述, 对于同步DS-CDMA信号, 式(3)中的  $\mathbf{P}$  仅存在每一个用户完整的伪码序列, 即  $\mathbf{P}$  的维数为  $N \times U$ ,  $\mathbf{A}_r$  为信道增益矩阵, 其维数为  $U \times U$ ,  $\mathbf{B}$  为信息序列矩阵, 其维数为  $M \times U$ ; 而对于异步DS-CDMA信号, 由式(5)可知, 每一个用户在  $\mathbf{P}$  中存在3个伪码序列, 即伪码序列的左子序列、完整的伪码序列和伪码序列的右子序列, 即  $\mathbf{P}$  的维数为  $2N \times 3U$ 、 $\mathbf{A}_r$  的维数为  $3U \times 3U$ 、 $\mathbf{B}$  的维数为  $M \times 3U$ 。

### 3.2 平行因子模型及其唯一辨识性

通过同步、异步短码DS-CDMA信号的分段方式并结合式(3)、式(5)可知, 利用多通道接收的DS-CDMA信号可等效为具有空(接收通道)、时(信息序列)、码(伪码序列)分集结构的3维矩阵, 其向量外积的形式为<sup>[12]</sup>

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{X}} &= \mathbf{p}_1 \odot \mathbf{A}_1 \odot \mathbf{b}_1 + \cdots + \mathbf{p}_{U'} \odot \mathbf{A}_{U'} \odot \mathbf{b}_{U'} \\ &= \sum_{u=1}^{U'} \mathbf{p}_u \odot \mathbf{A}_u \odot \mathbf{b}_u \end{aligned} \quad (10)$$

其中, “ $\odot$ ” 表示对矩阵求外积,  $\mathbf{p}_u$ 、 $\mathbf{a}_u$  和  $\mathbf{b}_u$  分别表示伪码序列矩阵  $\mathbf{P}$ 、信道增益矩阵  $\mathbf{A}$  和信息序列矩阵  $\mathbf{B}$  的第  $u$  列,  $U'$  表示该3维矩阵  $\bar{\mathbf{X}}$  的秩。

由于3维矩阵  $\bar{\mathbf{X}}$  中的元素为  $U'$  个2维矩阵元素的外积之和, 所以式(10)被称为3维矩阵的低秩分解过程, 即将3维矩阵向3个剖面方向投影为常规的2维矩阵的过程, 其作用是将其矩阵中3个方向的元素转化至2维, 以便利用常规分析2维矩阵的方法来分析3维矩阵。也被称为PARAFAC(平行因子)模型<sup>[13]</sup>, 如图2所示。

图2中,  $\mathbf{P} = [\mathbf{p}_1 \mathbf{p}_2 \cdots \mathbf{p}_{U'}]_{N' \times U'}$ ,  $\mathbf{A} = [\mathbf{A}_1 \mathbf{A}_2 \cdots \mathbf{A}_{U'}]_{R \times U'}$  和  $\mathbf{B} = [\mathbf{b}_1 \mathbf{b}_2 \cdots \mathbf{b}_{U'}]_{M \times U'}$  称为PARAFAC的3个加载矩阵, 而且PARAFAC模型也是一种3线性分解模型, 它等效为多个2维矩阵低

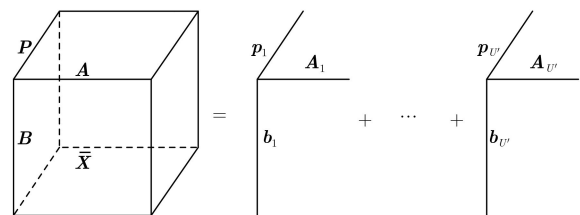


图2 3维矩阵低秩分解示意图

秩分解向3维矩阵低秩分解的拓展。此外, 对于同步短码DS-CDMA信号,  $N' = N$ ,  $U' = U$ ; 对于异步短码DS-CDMA信号,  $N' = 2N$ ,  $U' = 3U$ 。

在实际应用中, 利用PARAFAC模型的思想对某些信号数据进行建模时, 为了易于对3维矩阵中的数据进行分析和处理, 通常对3维矩阵进行剖面截取, 将其等价于常规的2维矩阵形式。则3维矩阵 $\mathbf{X}$ 在 $\mathbf{P}$ 方向上的第 $n'$ 个子剖面矩阵为

$$\mathbf{X}_P(n', :, :) = \mathbf{B} \text{diag}(\mathbf{p}_{n'}) \mathbf{A}^H, n' = 1, 2, \dots, N' \quad (11)$$

其中,  $\text{diag}(\cdot)$ 表示矩阵 $\mathbf{P}$ 的第 $l$ 行元素所构成的对角矩阵。将3维矩阵 $\mathbf{X}$ 在 $\mathbf{P}$ 方向上的全部 $N'$ 个子剖面矩阵按行排列, 得到3维矩阵 $\mathbf{X}$ 在 $\mathbf{P}$ 方向上的剖面矩阵 $\overline{\mathbf{X}}_P$ 为

$$\overline{\mathbf{X}}_P = (\mathbf{P} \odot \mathbf{B}) \mathbf{A}^H, n' = 1, 2, \dots, N' \quad (12)$$

其中,  $\odot$ 表示求两个矩阵的外积。

同理可得, 按照式(11)分别对3维矩阵 $\mathbf{X}$ 在 $\mathbf{B}$ 方向和 $\mathbf{A}$ 方向上截取剖面, 得到 $M$ 个在 $\mathbf{B}$ 方向和 $R$ 个在 $\mathbf{A}$ 方向上的子剖面, 进一步得到在 $\mathbf{B}$ 方向的剖面矩阵 $\overline{\mathbf{X}}_B$ 和在 $\mathbf{A}$ 方向的剖面矩阵 $\overline{\mathbf{X}}_A$

$$\overline{\mathbf{X}}_B = (\mathbf{B} \odot \mathbf{A}) \mathbf{P}^H, m = 1, 2, \dots, M \quad (13)$$

$$\overline{\mathbf{X}}_A = (\mathbf{A} \odot \mathbf{P}) \mathbf{B}^H, r = 1, 2, \dots, R \quad (14)$$

由式(12)、式(13)和式(14)可得, 3个方向上的剖面矩阵 $\overline{\mathbf{X}}_P$ ,  $\overline{\mathbf{X}}_B$ 和 $\overline{\mathbf{X}}_A$ 具有相同的数据元素, 也是3维矩阵 $\mathbf{X}$  3种不同的投影方式。因此, 通过对3个加载矩阵进行分析和处理等价于对3维矩阵 $\mathbf{X}$ 进行处理。

根据矩阵分解的知识可得, 2维矩阵的低秩分解存在不可辨识性(即低秩分解不唯一), 而3维矩阵低秩分解在满足下列条件时, 可唯一辨识性, 即式(12)、式(13)和式(14)中的加载矩阵应满足

$$K_P + K_A + K_B \geq 2(U' + 1) \quad (15)$$

则3维矩阵的低秩分解在允许列模糊和尺度模糊的情况下, 其具有可唯一辨识性, 即可唯一地确定3个加载矩阵 $\mathbf{P}$ ,  $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}$ 。其中,  $K_P$ ,  $K_A$ 和 $K_B$ 分别表示3个加载矩阵的Kruskal秩。

在实际DS-CDMA通信系统中, 不同的接收通道彼此之间相互独立, 不同用户的伪码序列和信息序列也相互独立。因此, 伪码序列矩阵 $\mathbf{P}$ 、增益矩阵 $\mathbf{A}$ 、信息序列矩阵 $\mathbf{B}$ 的各列相互独立, 即他们满足列满秩。所以, 式(15)中的可唯一辨识条件可写为

$$\begin{aligned} \min(N', U') + \min(R, U') + \min(M, U') \\ \geq 2(U' + 1) \end{aligned} \quad (16)$$

不失一般性, 就实际DS-CDMA通信系统而

言, 一般都会满足 $N' \gg U'$ ,  $M \gg U'$ , 所以式(16)可进一步简化为

$$\min(R, U') \geq 2 \quad (17)$$

当通道个数 $R \geq 2$ 时, 对任意 $U \geq 2$ , 式(17)均成立, 这表明理论上仅通过2个通道对同步、异步短码DS-CDMA信号进行接收, 即可完成任意大于或等于2个用户的DS-CDMA信号的盲解扩。同时, 当仅存在一个用户即 $U = 1$ 时, 不满足式(17)中的可唯一辨识条件。因此, 本文所讨论方法不适用于理想情况下的单用户信号。

### 3.3 各用户伪码序列及信息序列估计方法

在对2维的信号数据矩阵进行低秩分解时, 传统的做法是对矩阵进行特征值或奇异值分解, 而针对3维矩阵的低秩分解常采用交替迭代最小二乘算法<sup>[14]</sup>。由式(10)可以得到最小二乘拟合的代价函数为

$$f(\overline{\mathbf{X}}_B; \mathbf{B}, \mathbf{A}, \mathbf{P}) = \arg \min_{\mathbf{P}} \|\overline{\mathbf{X}}_B - (\mathbf{B} \odot \mathbf{A}) \mathbf{P}^H\|_F \quad (18)$$

其中,  $\|\cdot\|_F$ 表示矩阵的Frobenius范数, 并且通过该代价函数来更新伪码序列矩阵 $\mathbf{P}$

$$\mathbf{P} = \overline{\mathbf{X}}_B^H \left[ (\mathbf{B} \odot \mathbf{A})^H \right]^\dagger \quad (19)$$

其中,  $[\cdot]^\dagger$ 表示对矩阵求Moore-Penrose逆<sup>[15]</sup>。

同理, 根据式(13)、式(14)可以得到信息序列矩阵 $\mathbf{B}$ 和接收通道增益矩阵 $\mathbf{A}$ 的最小二乘表达式为

$$\mathbf{B} = \overline{\mathbf{X}}_A^H \left[ (\mathbf{A} \odot \mathbf{P})^H \right]^\dagger \quad (20)$$

$$\mathbf{A} = \overline{\mathbf{X}}_P^H \left[ (\mathbf{P} \odot \mathbf{B})^H \right]^\dagger \quad (21)$$

采用交替迭代最小二乘算法对3个加载矩阵每一次进行更新时, 首先在前一个加载矩阵更新完后, 再利用交替迭代最小二乘实现下一个加载矩阵的更新, 依次类推, 直到所有加载矩阵完成更新, 最后通过循环迭代直到算法收敛。此时矩阵 $\mathbf{P}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{A}$ 即为伪码序列矩阵、信息序列矩阵、信道增益矩阵的估计值。

综上所述, 现将基于平行因子的多通道同步、异步短码DS-CDMA信号伪码序列估计的步骤归纳如下:

步骤 1 对同步、异步DS-CDMA信号分别按照3.1节所示的分段方法进行分段得到信号的数据矩阵;

步骤 2 将分段后的数据矩阵按照式(12)、式(13)和式(14)分别得到3个加载矩阵方向的剖面矩阵 $\overline{\mathbf{X}}_P$ ,  $\overline{\mathbf{X}}_A$ 和 $\overline{\mathbf{X}}_B$ ;



步骤3 随机初始化加载矩阵 $\mathbf{P}_0$ ,  $\mathbf{A}_0$ ,  $\mathbf{B}_0$ , 令迭代次数 $\beta = 0$ ;

步骤4 使 $\beta = \beta + 1$ , 按照式(22 a)计算伪码序列矩阵 $\mathbf{P}$ 的第 $\beta$ 次迭代值 $\bar{\mathbf{P}}_\beta$

$$\bar{\mathbf{P}}_\beta = \bar{\mathbf{X}}_B^H \left[ (\bar{\mathbf{B}}_{\beta-1} \odot \bar{\mathbf{A}}_{\beta-1})^H \right]^\dagger \quad (22a)$$

步骤5 按照式(22 b)计算信息序列矩阵 $\mathbf{B}$ 的第 $\beta$ 次迭代值 $\bar{\mathbf{B}}_\beta$

$$\bar{\mathbf{B}}_\beta = \bar{\mathbf{X}}_A^H \left[ (\bar{\mathbf{A}}_{\beta-1} \odot \bar{\mathbf{P}}_\beta)^H \right]^\dagger \quad (22b)$$

步骤6 按照式(22 c)计算通道增益矩阵 $\mathbf{A}$ 的第 $\beta$ 次迭代值 $\bar{\mathbf{A}}_\beta$

$$\bar{\mathbf{A}}_\beta = \bar{\mathbf{X}}_P^H \left[ (\bar{\mathbf{P}}_\beta \odot \bar{\mathbf{B}}_\beta)^H \right]^\dagger \quad (22c)$$

步骤7 按照式(22 d)计算迭代终止条件 $\rho$

$$\rho = \left\| \bar{\mathbf{X}}_B - (\bar{\mathbf{B}}_\beta \odot \bar{\mathbf{A}}_\beta) (\bar{\mathbf{P}}_\beta)^H \right\|_F - \left\| \bar{\mathbf{X}}_B - (\bar{\mathbf{B}}_{\beta-1} \odot \bar{\mathbf{A}}_{\beta-1}) (\bar{\mathbf{P}}_{\beta-1})^H \right\|_F \quad (22d)$$

步骤8 判断迭代终止条件 $|\rho| \leq \varepsilon$  ( $\varepsilon$ 一般取 $10^{-10}$ ), 若不满足, 则返回步骤4—步骤7; 若满足, 则算法迭代结束。

由式(15)—式(17)可知3个加载矩阵(伪码序列矩阵 $\mathbf{P}$ 、增益矩阵 $\mathbf{A}$ 、信息序列矩阵 $\mathbf{B}$ )满足可唯一辨识条件, 具有可唯一辨识性, 因此, 本文算法整体收敛(相关证明可参考文献[14])。当算法收敛时, 得到的加载矩阵 $\bar{\mathbf{P}}_\beta$ 和 $\bar{\mathbf{B}}_\beta$ 即为同步、异步短码DS-CDMA信号伪码序列和信息序列的估计值。

#### 4 仿真实验与结果分析

实验1 为了验证本文所提算法对同步、异步

短码DS-CDMA信号伪码序列估计的有效性。取伪码序列长度 $N=127$  chip, 信息分组数 $M=1000$ , 用户数 $U=2$ , 通道数 $R=4$ , 信噪比 $\text{SNR}=-7$  dB的情况下分别对同步、异步短码DS-CDMA信号进行仿真。同步时 $\tau_u = 0$ , 异步时 $\tau_u \in [1, N]$ 中的随机整数。同步、异步短码DS-CDMA信号伪码序列的真实值和估计值如图3、图4和图5所示。

从图3和图4可知, 因分段不同, 同步DS-CDMA信号各用户伪码序列的估计仅存在完整的伪码周期序列, 异步DS-CDMA信号各用户伪码序列的估计都存在3个子序列, 即图4(d)和图4(f)分别为图4(b)的左子序列和右子序列, 二者进行拼接即可得到图4(b)中完整的伪码周期序列。这与第3.1节的理论分析一致。

通过第3.3节所述的方法即可完成对完整伪码周期序列进行提取, 以实现所有用户伪码序列的估计, 图5为异步短码DS-CDMA信号伪码序列真实值与估计值的对比。其中, 图5(b)和图5(d)即为提取的完整伪码周期序列。

实验2 为了比较本文所提算法在不同通道数下对异步DS-CDMA信号伪码序列估计性能的影响。取伪码序列长度 $N=127$  chip, 接收信号分组数为 $M=1000$ 组, 用户数 $U=4, 6, 8, 10$ 分别在通道数 $R=6, 10$ 的条件下进行200次蒙特卡洛仿真。伪码序列估计的性能曲线分别如图6所示。

从图6可得, 用户数不同的异步DS-CDMA信号伪码序列估计的错误概率在不同信噪比下, 随着 $R$ 的增加而不断降低, 这是因为通道数越多, 接收到的有用信号就越多, 从而在一定程度上更有利于平行因子的低秩分解, 使得伪码序列估计的错误概率更低。通过该仿真实验还进一步说明在满足3维

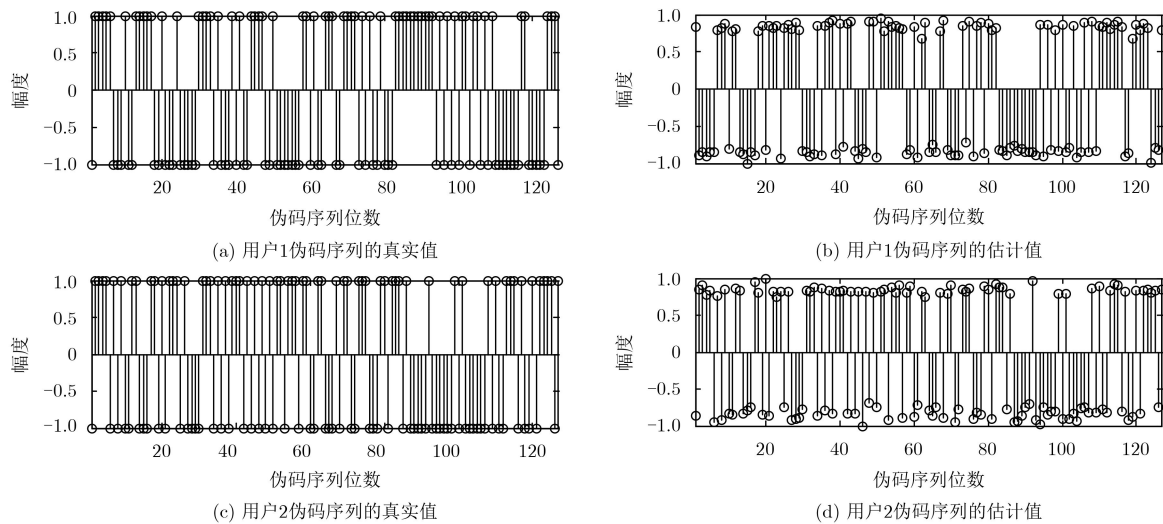


图3 同步短码DS-CDMA信号伪码序列真实值与估计值对比

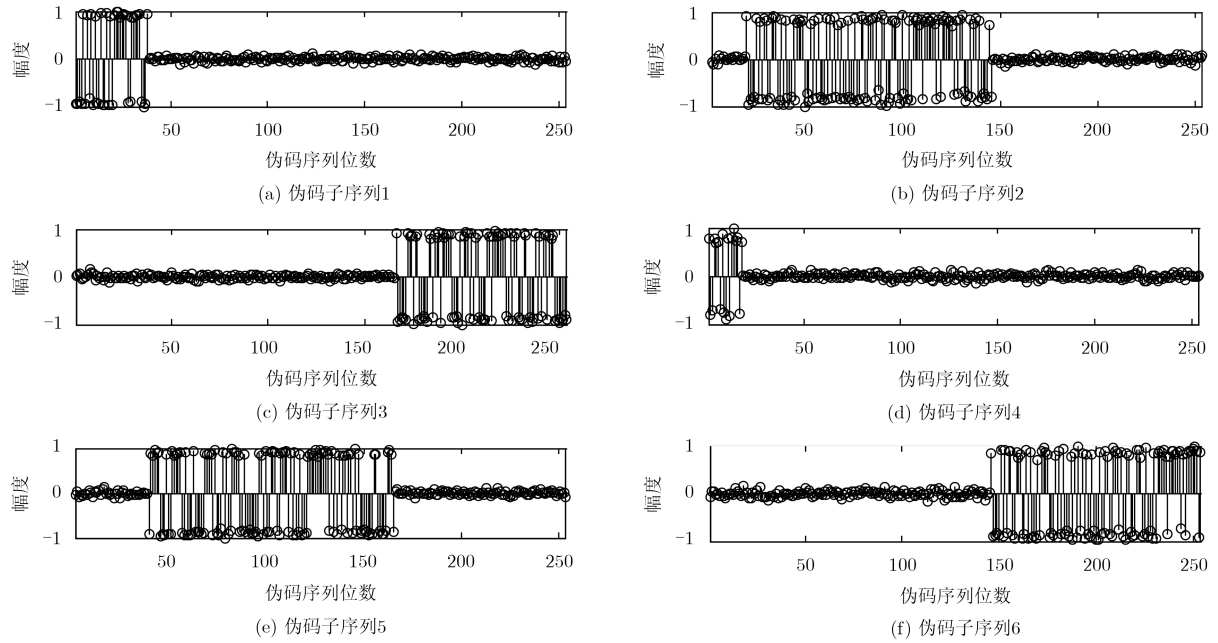


图4 异步短码DS-CDMA信号伪码序列估计值

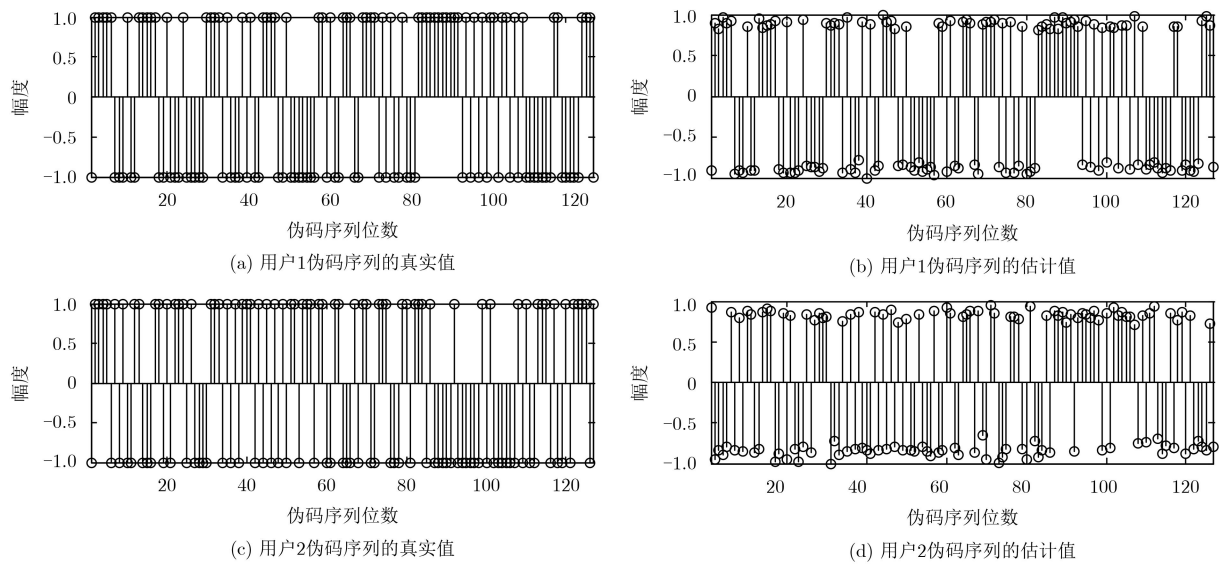
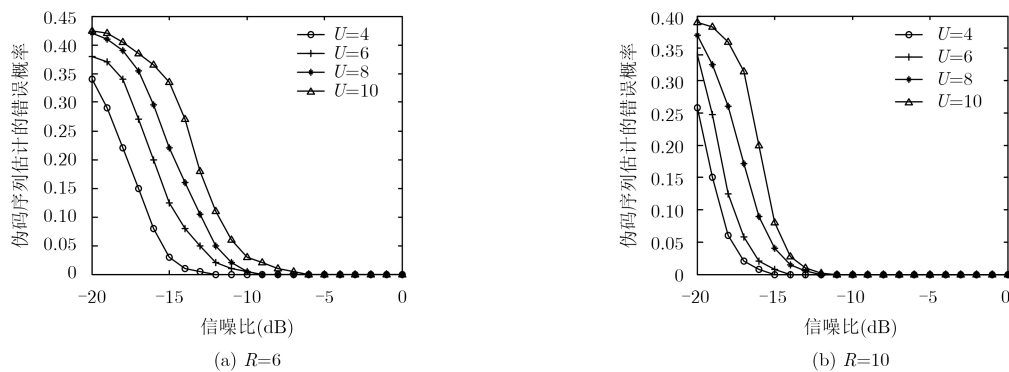


图5 异步短码DS-CDMA信号伪码序列真实值与估计值对比

图6 不同 $R$ 值下异步短码DS-CDMA信号伪码序列估计的性能曲线

矩阵可唯一辨识的条件下,即使接收通道少于用户数,本文方法也能有效地对各用户的伪码序列进行估计。此外,从图6可得,异步DS-CDMA信号伪码序列性能由用户数和通道数决定,且随着通道数的增加,计算复杂度也随之增加。因此,在实际通信中,应先确定用户数,再考虑通道数最优值的选取问题。

**实验3** 为了对比本文所提方法与文献[9]算法对异步DS-CDMA信号的伪码序列估计性能。取信号伪码序列的长度分别为 $N=127$  chip, 用户数 $U=4, 6$ 分别在信号分组数 $M=1000$ 组、2000组的条件下进行200次蒙特卡洛仿真。考察两种方法对信号伪码序列估计的错误概率结果如图7所示。

从图7可得,本文所提方法对DS-CDMA信号伪码序列估计的性能均优于文献[9]中的方法。同时在不同用户数的情况下,文献[9]在 $M=2000$ 组所达到的信噪比容限值,本文方法只需要 $M=1000$ 组即可实现。通过仿真实验证明了在低信噪比情况下,针对异步DS-CDMA信号,本文方法比文献[9]表现出更优越的估计性能,从而进一步说明本文方法在更为一般的异步情况下更具有实用性。

**实验4** 为了对比本文所提方法与文献[9]算法对异步DS-CDMA信号的信息序列估计性能。取信

号分组数为 $M=1000$ 组,用户数为 $U=4, 6$ 分别在信号伪码序列长度为 $N=127$  chip, 255 chip的条件下进行200次蒙特卡洛仿真。考察两种方法对信号信息序列估计的错误概率结果如图8所示。

从图8可得,当使用本文所提方法与文献[9]中方法对DS-CDMA信号的信息序列进行估计时,也可以得出实验3中的相应结论,即本文所提方法需要较少的数据长度即可得到文献[9]中的方法的盲估计性能。另外,本文方法相对现有的盲估计方法来说,优点在于并不需要预先估计出所有用户的伪码序列,即可实现对所有用户信息序列的估计,这对于电子对抗、通信干扰至关重要。

## 5 结束语

对于同步和异步短码DS-CDMA信号的盲解扩问题,本文将传统的单通道接收信号拓展至多通道接收信号,并针对同步、异步DS-CDMA信号采取不同的分段方式,同时将二者分段后的数据矩阵等效为统一的平行因子模型,最后通过交替迭代最小二乘算法实现了各用户伪码序列和信息码序列的估计。仿真实验结果表明,对于同步和异步DS-CDMA信号,在通道数为6、信噪比为 $-10$  dB下,能够对10个用户伪码序列进行有效估计。同时,本文方法还可以在未知伪码序列的情况下对信号进行盲解扩。

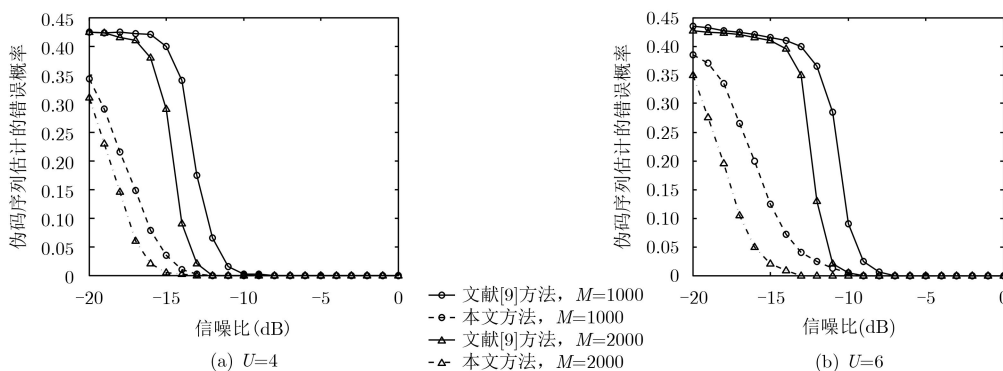


图7 异步时本文方法与文献[9]方法对比性能曲线

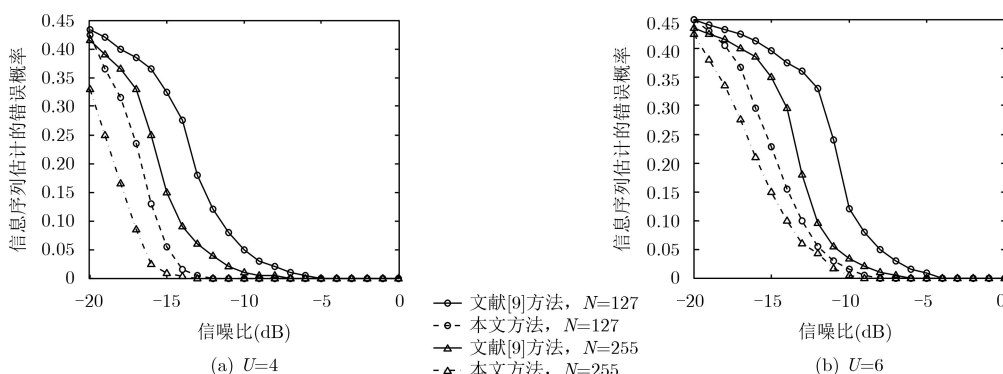


图8 异步时本文方法与文献[9]方法对比性能曲线

## 参 考 文 献

- [1] 田日才, 迟永钢. 扩频通信[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2014: 1–5.  
TIAN Ricai and CHI Yonggang. Spread Spectrum Communication[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2014: 1–5.
- [2] LUO Zhongqiang and ZHU Lidong. A charrelation matrix-based blind adaptive detector for DS-CDMA Systems[J]. *Sensors*, 2015, 15(8): 20152–20168. doi: [10.3390/s150820152](https://doi.org/10.3390/s150820152).
- [3] 张天骐, 杨强, 宋玉龙, 等. 基于相似度的直扩信号盲解扩方法[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(7): 1451–1456. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2017.07.04](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2017.07.04).  
ZHANG Tianqi, YANG Qiang, SONG Yulong, *et al.* Similarity based blind despread method of DS-SS signal[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 39(7): 1451–1456. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2017.07.04](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2017.07.04).
- [4] ZHOU Liqing, LEUNG H, XU Peng, *et al.* The Kalman filtering blind adaptive multi-user detector based on tracking algorithm of signal subspace[J]. *Information*, 2015, 6(1): 3–13. doi: [10.3390/info6010003](https://doi.org/10.3390/info6010003).
- [5] 赵知劲, 李淼, 尚俊娜. 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[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(7): 1788–1793. doi: [10.11999/JEIT151087](https://doi.org/10.11999/JEIT151087).  
ZHAO Zhijin, LI Miao, and SHANG Junna. Blind estimation of LSC-DS-CDMA signal based on matrix completion and triple correlation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(7): 1788–1793. doi: [10.11999/JEIT151087](https://doi.org/10.11999/JEIT151087).
- [6] GU Xiaowei, ZHAO Zhijin, and SHEN Lei. Blind estimation of pseudo-random codes in periodic long code direct sequence spread spectrum signals[J]. *IET Communications*, 2016, 10(11): 1273–1281. doi: [10.1049/iet-com.2015.0374](https://doi.org/10.1049/iet-com.2015.0374).
- [7] 张天骐, 赵军桃, 江晓磊. 基于多主分量神经网络的同步DS-CDMA伪码盲估计[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(11): 2638–2647. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2016.11.27](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2016.11.27).  
ZHANG Tianqi, ZHAO Juntao, and JIANG Xiaolei. PN code sequence blind estimate of synchronous DS-CDMA based on multi-principal component neural network[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2016, 38(11): 2638–2647. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2016.11.27](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2016.11.27).
- [8] 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. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2008.07.013](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2008.07.013).  
FU Weihong, YANG Xiaoniu, and LIU Naian. The 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. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2008.07.013](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2008.07.013).
- [9] 任啸天, 徐晖, 黄知涛, 等. 基于Fast-ICA同、异步系统短码CDMA信号扩频序列与信息序列盲估计[J]. 电子学报, 2011, 39(12): 2726–2732.  
REN Xiaotian, XU Hui, HUANG Zhitao, *et al.* Fast-ICA based blind estimation of spreading and information sequences of short-code CDMA signals in synchronous and asynchronous systems[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(12): 2726–2732.
- [10] DE LATHAUWER L and CASTAING J. Tensor-based techniques for the blind separation of DS-CDMA signals[J]. *Signal Processing*, 2007, 87(2): 322–336. doi: [10.1016/j.sigpro.2005.12.015](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2005.12.015).
- [11] ZHANG Tianqi, QIAN Wenrui, ZHANG Gang, *et al.* Parameter estimation of MC-CDMA signals based on modified cyclic autocorrelation[J]. *Digital Signal Processing*, 2016, 54: 46–53. doi: [10.1016/j.dsp.2016.03.007](https://doi.org/10.1016/j.dsp.2016.03.007).
- [12] 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](https://doi.org/10.1109/78.824675).
- [13] HARSHMAN R A, HONG S, and LUNDY M E. Shifted factor analysis-Part I: Models and properties[J]. *Journal of Chemometrics*, 2003, 17(7): 363–378. doi: [10.1002/cem.808](https://doi.org/10.1002/cem.808).
- [14] 张天骐, 强幸子, 马宝泽, 等. 基于最小二乘的同步多用户非周期长码直扩信号扩频序列估计[J]. 电波科学学报, 2016, 31(6): 1113–1123. doi: [10.13443/j.cjors.2016030201](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2016030201).  
ZHANG Tianqi, QIANG Xingzi, MA Baoze, *et al.* Estimation of the spread spectrum sequence for synchronous multi-user aperiodic long-code DSSS signals based on least squares[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2016, 31(6): 1113–1123. doi: [10.13443/j.cjors.2016030201](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2016030201).
- [15] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2013: 604–608.  
ZHANG Xianda. Matrix Analysis and Applications[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 604–608.

周 杨: 男, 1989年生, 博士, 研究方向为通信信号的盲处理.

张天骐: 男, 1971年生, 博士后, 教授, 研究方向为通信信号的调制解调、盲处理、语音信号处理、神经网络实现以及FPGA实现.