

利用拟合优度检验的 NPLSC-DSSS 信号伪码盲估计

赵知劲 强芳芳* 李淼 沈雷 王海泉

(杭州电子科技大学通信工程学院 杭州 310018)

摘要: 针对非周期短码扩频长码加扰直扩(NPLSC-DSSS)信号的伪码估计问题, 该文首先给出了 m 序列三阶相关函数(TCF)共同峰理论和 NPLSC-DSSS 信号 TCF 估计量的概率函数。其次, 利用 TCF 峰的共轭系特性构建了 TCF 峰值序列, 提出了 TCF 共同峰检测的二元假设模型和利用拟合优度检验的 TCF 共同峰检测算法。同时, 为提高伪码估计性能, 该文利用正反向 TCF 三阶相关峰性质和共轭系 TCF 峰值点累加和递增性质排除大量伪峰。最后通过矩阵斜消法实现长短伪码的盲估计。仿真结果表明, 该文方法在低信噪比条件下能够有效估计 NPLSC-DSSS 信号的伪随机码。

关键词: 扩频通信; 长短码直扩信号; 三阶相关理论; 拟合优度检验; 伪码盲估计

中图分类号: TN914.42

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)03-0749-05

DOI: 10.11999/JEIT160541

Blind Estimation of Pseudo-random Noise Codes in NPLSC-DSSS Signals Based on Goodness of Fit Test

ZHAO Zhijin QIANG Fangfang LI Miao SHEN Lei WANG Haiquan

(School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: For blind estimation of Pseudo-random Noise (PN) codes in Non-Periodic Long and Short Codes Direct Sequence Spread Spectrum (NPLSC-DSSS) signals, the Triple Correlation Function (TCF) common peak theory of m -sequence and probability function of NPLSC-DSSS signals' TCF estimate are given firstly. Then sequences of TCF peaks are built with their conjugate sets' features, binary hypothesis test model and accurate detection algorithm of TCF common peaks using goodness of fit test are proposed. Meanwhile, many false peaks are eliminated to improve the estimation performance using the property of forward and backward TCF peaks and cumulative-sum's increasing trend of TCF peaks in conjugate sets. Lastly, the primitive polynomials of long and short pseudo-random codes can be estimated with the matrix's oblique elementary method. Simulations show that the proposed method can effectively estimate the PN codes of NPLSC-DSSS signal at low Signal-to-Noise Ratio (SNR).

Key words: Spread spectrum communication; Long and Short Codes Direct Sequence Spread Spectrum (LSC-DSSS); Triple correlation theory; Goodness of fit test; Pseudo-random Noise (PN) codes blind estimation

1 引言

随着扩频通信的不断发展, 短码扩频长码加扰的直扩(LSC-DSSS)信号应用越来越广泛。由于长伪码周期过长, 接收端很难截获包含一个及以上的长伪码周期的信号, 给伪码盲估计带来困难和挑战。

针对长码扩频的直扩信号扩频码盲估计, 文献[1,2]提出宽窗口法解决特征分解法带来的酉模糊问题; 文献[3]提出重叠分段特征分解法; 文献[4]提出

分段矩阵特征分解法和基于最优移位相加特性的信息码剥离算法估计周期长码直扩信号的扩频码; 文献[5]对接收信号构成的观测矩阵进行奇异值分解, 通过左奇异向量实现扩频码序列盲估计。

非周期短码扩频长码加扰直扩(NPLSC-DSSS)信号可利用的信号样本不足一个长码周期, 不能采用以上方法。文献[6]提出三阶相关函数(TCF)理论, 相比特征分解法, 其对信息缺失不敏感^[7-9]。文献[10]提出了基于 m 序列共同峰的伪码估计方法, 但此方法需要预先给定 TCF 峰值点集合。

本文在文献[10]提出的共同峰理论基础上, 分析了 NPLSC-DSSS 信号 TCF 估计量的概率函数, 提出了基于拟合优度检验的伪码盲估计方法, 并利用

收稿日期: 2016-05-06; 改回日期: 2016-10-31; 网络出版: 2016-12-20

*通信作者: 强芳芳 qiangffmy@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)

正反向 TCF 峰值点性质以及共轭系 TCF 峰值点累加和递增性质排除大量伪峰, 提高伪码估计性能。

2 理论基础

2.1 信号模型

假设已知 NPLSC-DSSS 信号的扩频码码片速率, 以扩频码码片速率进行采样, 并将 [0,1] 信号映射为 [+1,-1] 信号, 则基带信号的采样值可表示为^[11]

$$y(l) = Ad(l)b(l)c(l) + v(l), \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (1)$$

式中, l 表示采样时刻序号; A , $d(l)$, $b(l)$ 和 $c(l)$ 分别表示信号幅度、信息码、短扩频码和长扰码; 噪声 $v(l)$ 服从 $N(0, \sigma^2)$ 。长短伪码均采用 m 序列, 扩频码周期为 G , 扰码周期为 N 。截获信号长度 $L < N$ 。

2.2 长短码的 TCF 共同峰

对于式(1)所示的信号模型, 令 $s(l) = b(l)c(l)$, 已知 $b(l)$ 和 $c(l)$ 相互统计独立, 则 $s(l)$ 的正向 TCF 为

$$C_s^f(p, q) = E[s(l)s(l+p)(l+q)] = C_b^f(p, q)C_c^f(p, q) \quad (2)$$

其中 $C_b^f(p, q)$ 和 $C_c^f(p, q)$ 分别为 $b(l)$ 和 $c(l)$ 的正向 TCF。由式(2)可得

$$C_s^f(p, q) = \begin{cases} 1, & b(l-p)b(l-q) = b(l) \& c(l-p)c(l-q) = c(l) \\ -1/N, & b(l-p)b(l-q) = b(l) \& c(l-p)c(l-q) \neq c(l) \\ -1/G, & b(l-p)b(l-q) \neq b(l) \& c(l-p)c(l-q) = c(l) \\ 1/NG, & b(l-p)b(l-q) \neq b(l) \& c(l-p)c(l-q) \neq c(l) \end{cases} \quad (3)$$

$C_s^f(p, q) = 1$ 表示 (p, q) 为长短码的共同峰, $C_b^f(p, q)$ 和 $C_c^f(p, q)$ 在 $N \times N$ 范围内存在有限个共同峰^[10]。

2.3 NPLSC-DSSS 信号 TCF 估计量的概率函数

接收信号通过延迟相乘法消除信息码干扰:

$$y_1(l) = y(l) \cdot y(l+1) \approx A^2 b(l+z_1)c(l+z_2) + v_1(l) \quad (4)$$

式中, z_1 , z_2 分别为短码和长码序列的相对偏移量, $v_1(l)$ 服从 $N(0, \sigma^4 + 2A^2\sigma^2)$ 。

在 $L \times L$ 范围内估计的正反向 TCF 如式(5):

$$\left. \begin{aligned} \tilde{C}^f(p, q) &= \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L y_1(l)y_1(l+p)y_1(l+q) \\ \tilde{C}^b(p', q') &= \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L y_1(l)y_1(l-p')y_1(l-q') \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中, $0 < p, q < L$, $0 < p', q' < L$ 。将三阶相关函数表示成矩阵的形式:

$$\tilde{C}^f = \begin{bmatrix} \tilde{C}^f(1,1) & \tilde{C}^f(1,2) & \dots & \tilde{C}^f(1,L) \\ \tilde{C}^f(2,1) & \tilde{C}^f(2,2) & \dots & \tilde{C}^f(2,L) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{C}^f(L,1) & \tilde{C}^f(L,2) & \dots & \tilde{C}^f(L,L) \end{bmatrix} \quad (6)$$

分析可知 $\tilde{C}^f(p, q)$ 的概率密度函数为

$$p(\tilde{C}^f(p, q)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_2^2}} \exp\left\{-\left(\tilde{C}^f(p, q) - A^6 C_s^f(p, q)\right)^2 / 2\sigma_2^2\right\} \quad (7)$$

其中, $\sigma_2^2 = (\sigma^{12} + 6A^2\sigma^{10} + 15A^4\sigma^8 + 20A^6\sigma^6 + 15A^8\sigma^4 + 6A^{10}\sigma^2) / L$ 。同理分析可知 $\tilde{C}^b(p', q')$ 有类似结果。

3 基于拟合优度的长短伪码盲估计

3.1 利用拟合优度检验的 TCF 共同峰检测

由 (p, q) 可得到 $L \times L$ 范围内共轭系坐标点序列 $\{(2^k p, 2^k q)\}_{k=0}^{K-1}$, 各点对应的 TCF 值序列为 $\{t_k\}_{k=0}^{K-1}$, 其中 $t(k) = \tilde{C}^f(2^k p, 2^k q)$ 。根据峰值点性质及式(3)和式(7)可知: 若 (p, q) 为共同峰值点, 则其共轭系坐标点序列也是共同峰值点, 对应的 TCF 值序列 $\{t_k\}_{k=0}^{K-1}$ 服从均值为 A^6 、方差为 σ_2^2 的正态分布, 分布函数为

$$F_0(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_2^2}} \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{(z - A^6)^2}{2\sigma_2^2}\right) dz \quad (8)$$

当 (p, q) 为非共同峰值点时, 分布函数不满足上式, 因此可用式(8)进行检验。

故共同峰的检测可等价于判断 $\{t_k\}_{k=0}^{K-1}$ 是否符合均值为 A^6 、方差为 σ_2^2 的正态分布, 可采用基于拟合优度的高斯检验法, 二元假设检验模型表示为

$$\left. \begin{aligned} H_0: & F(t) = F_0(t) \\ H_1: & F(t) \neq F_0(t) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

H_0 表示 (p, q) 为共同峰值点; H_1 表示 (p, q) 为非共同峰值点; $F(t)$ 表示 (p, q) 对应共轭系的分布函数。

为了检验此假设, 首先需将 (p, q) 对应的 K 个样本 $\{t_k\}_{k=0}^{K-1}$ 从小到大排序, 得样本经验分布函数^[12,13]:

$$\tilde{F}(t) = \begin{cases} 0, & t < t_0 \\ m/K, & t_{m-1} \leq t < t_m, m = 1, 2, \dots, K-1 \\ 1, & t \geq t_{K-1} \end{cases} \quad (10)$$

当 (p, q) 是共同峰值点时, $\tilde{F}(t)$ 趋近于 $F_0(t)$ 。本文引入 KS(Kolmogorov-Simirnov)检验, 统计量 T 定义为 $F(t)$ 与 $F_0(t)$ 这两个分布在垂直方向上的最大距离^[13-16]:

$$T = \sup_t |F(t) - F_0(t)| \quad (11)$$

式中 \sup 表示最大垂直距离。实际中, T 可表示为

$$\tilde{T} = \max_{0 < k < K+1} |\tilde{F}(t_k) - F_0(t_k)| \quad (12)$$

以此统计量 \tilde{T} 来判断。 \tilde{T} 的显著性水平 $\tilde{\alpha}$ 定义为

$$\tilde{\alpha} = P(T > \tilde{T}) = \Gamma\left[\left(\sqrt{K} + 0.12 + 0.11/\sqrt{K}\right)\tilde{T}\right] \quad (13)$$

其中 $\Gamma(x) = 2\sum_{i=1}^{+\infty} (-1)^{i-1} \exp(-2i^2 x^2)$ 。当 $\tilde{\alpha} = P(T > \tilde{T})$ 小于给定显著性水平 α 时, 拒绝原假设 H_0 , 反之则接受 H_0 。

3.2 共同峰粗提取

为提高效率和伪码估计性能，在进行拟合优度检验前需排除大量虚假共同峰，实现共同峰粗提取。

对于一个周期为 M 的 m 序列， $C^f(p, q)$ 与 $C^b(p', q')$ 在主值域 $M \times M$ 内有以下重要性质：

性质 1: 若 (p, q) 是峰值点，则 (q, p) 也为峰值点。

性质 2: 若满足 $p > q$ 的 (p, q) 是正向 TCF 峰值点，则 $(p, p - q)$ 是反向 TCF 峰值点。

性质 3: 共轭系 TCF 峰值点累加和呈递增趋势。

当 m 序列长度 L' 小于 M 时，在 $\lfloor L'/2 \rfloor \times \lfloor L'/2 \rfloor$ 范围内保持良好的三阶相关特性，能得到正确峰值点^[7]，故可利用 m 序列 TCF 性质筛选峰值点。

本文通过以上 3 个性质完成共同峰的粗提取。

3.3 长短伪码盲估计步骤

综上所述，基于拟合优度检验的 NPLSC-DSSS 信号的长短伪码盲估计算法步骤为：

(1)由接收信号计算正反向 TCF 矩阵 \tilde{C}^f 和 \tilde{C}^b ；

(2)共同峰粗提取。由限幅、共同峰匹配及共轭系性质筛选可能共同峰，记入集合 Ω_1 ，完成粗提取。

(3)拟合优度精检测。对 Ω_1 中的元素逐个进行 KS 检验，将判决为共同峰的坐标集合记为 Ω_2 。

(4)共轭系分类。按是否属于同一共轭系分为 W 组，同组元素记入 Ω_{2i} ，则 $\Omega_2 = \{\Omega_{21}, \Omega_{22}, \dots, \Omega_{2W}\}$ 。

(5)伪码盲估计。通过矩阵斜消法求最大公因式，因式分解可得长短伪码本原多项式，完成估计。

3.4 算法复杂度分析

本文所提算法的步骤(1)中信号正反向 TCF 的计算复杂度为 $O(L^3)$ ；步骤(2)实现共同峰粗提取，复杂度为 $O(L^2)$ ；步骤(3)中拟合优度 KS 检验的复杂度为 $O((L/2)^2)$ ；步骤(4)的复杂度为 $O(L/2)$ ；步骤(5)中矩阵斜消的复杂度为 $O(L/2)$ ，因式分解的复杂度为 $O(r2^r)$ ，其中 r 为最大公因式的阶数。由于 $L \gg r$ ，故本文算法的复杂度为 $O(L^3)$ 。

4 算法仿真与性能分析

信号幅度设定为 $A = 1$ ；信息符号是随机产生的

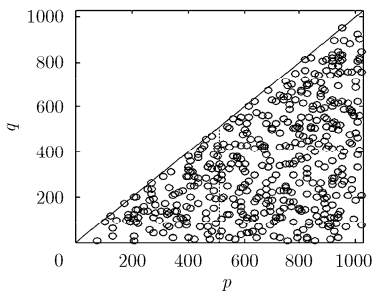


图1 限幅提取

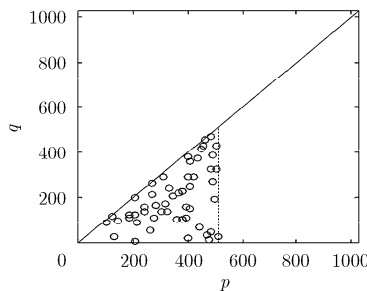


图2 共同峰粗提取

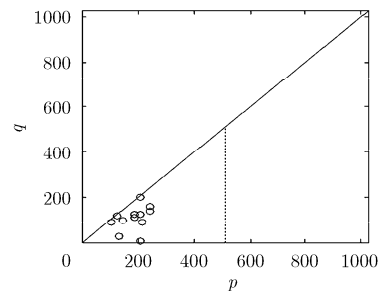


图3 拟合优度精检测

$\{\pm 1\}$ ；信噪比定义为 $SNR = 10\lg(A^2/\sigma^2)$ 。综合考虑共同峰漏检概率和计算量，较合适的限幅门限值范围在 0.06~0.10 之间^[10]，本文选取 $\delta = 0.1$ 。

4.1 TCF 共同峰检测

选用周期 $G = 31$ 的 m 序列作为扩频码，其本原多项式为 $f_b(x) = x^5 + x^2 + 1$ ；周期 $N = 2047$ 的 m 序列作为长扰码，其本原多项式为 $f_c(x) = x^{11} + x^9 + 1$ 。在 $SNR = 0$ dB， $L = \lfloor N/2 \rfloor$ 及 $\delta = 0.1$ 时，仿真本算法对 TCF 共同峰的检测效果。

由图 1 至图 3 可知，限幅提取得到大量伪峰，经过正反向 TCF 峰值点性质和共轭系性质可排除大量伪峰，再利用 KS 检验进一步筛选可能共同峰值点，大大提高了共同峰检测的正确率。

4.2 不同长码的 NPLSC-DSSS 信号伪码估计性能

短码选取同 4.1 节。长码选用 3 个周期不同的 m 序列，构成信号 1，信号 2 和信号 3，选择如表 1 所示。假设信息码已知， $L = 33G$ ，则 100 次蒙特卡罗仿真估计得到的长短码序列本原多项式均正确的概率与信噪比的关系曲线如图 4 所示。

由图 4 可知，对于信号 1，信号 2 和信号 3，达 90% 以上正确估计概率所需的信噪比分别为 -3.6 dB，-3.1 dB 和 0.4 dB。这是因为长码周期越短，相同长度的信号中其周期特性越明显，接收信号范围内存在的共同峰越多，因此伪码估计的正确率越高。

4.3 不同长度的 NPLSC-DSSS 信号伪码估计性能

扩频码和长扰码选取同 4.1 节。在信息码已知及未知情况下，当信号长度 L 分别取 $24G$ ， $33G$ 和 $66G$ 时，仿真结果如图 5 和图 6 所示。

由图 5 可知，信息码已知且 L 分别取 $24G$ ， $33G$

表 1 信号 1-信号 3 的长码 m 序列

信号	长码 m 序列周期	本原多项式
1	511	$f_{c1}(x) = x^9 + x^4 + 1$
2	2047	$f_{c2}(x) = x^{11} + x^9 + 1$
3	4095	$f_{c3}(x) = x^{12} + x^{11} + x^9 + x^7 + x^6 + x^5 + 1$

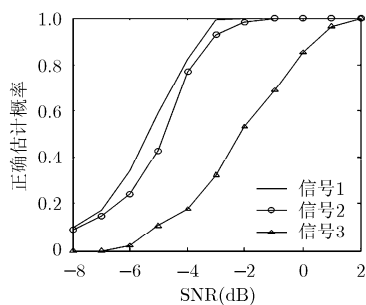


图4 长扰码对估计性能影响

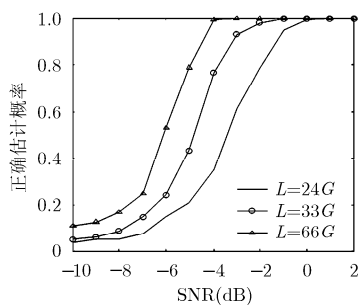


图5 信息码已知时估计性能

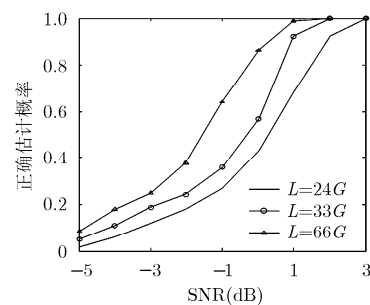


图6 信息码未知时估计性能

和66G时, 达90%以上的伪码正确估计概率所需的信噪比分别为-1.3 dB, -3.1 dB和-4.5 dB。由图6可知, 信息码未知且 L 分别取24G, 33G和66G时, 达90%以上的伪码正确估计概率所需的信噪比分别为1.9 dB, 0.9 dB和0.2 dB。信号长度一定, 正确估计概率随信噪比增大而提高; 信噪比一定, 伪码正确估计概率随接收信号长度的增大而提高。

4.4 算法性能对比

为了能够进一步验证本文算法的性能, 与文献[10]提出的算法进行比较。长短伪码本原多项式的选取与4.1节相同, 接收信号长度分别为 $L=24G$ 和 $L=66G$, 在信息码已知和未知两种情况下100次蒙特卡罗实验得到的仿真结果如图7和图8所示。

由图7和图8可知, 本文算法性能优于文献[10]所提出的算法。当伪码正确估计概率为90%、信号长度分别为 $L=24G$ 和 $L=66G$, 信息码已知时本

文算法比文献[10]算法提高信噪比约为3.9 dB和2.3 dB; 信息码未知时, 本文算法比文献[10]算法提高信噪比约为0.9 dB和0.5 dB。这是因为本文采用拟合优度检测方法, 结合正反向TCF峰值点匹配法及共轭系求和法筛选可能共同峰, 提高了共同峰检测的准确性。此外, 本文检测峰值点的范围远小于文献[10], 故在提高估计性能的前提下也大大降低了运算量, 提高了计算速度。

5 结束语

针对短码扩频、长码加扰的NPLSC-DSSS信号, 本文构造了TCF峰值序列, 提出了TCF共同峰检测的二元假设检验模型, 结合正反向TCF峰值点和共轭系峰值点性质消除伪峰的干扰, 提出了基于拟合优度检验的长短伪码盲估计方法。仿真结果表明了本文方法能够有效估计NPLSC-DSSS信号的长短伪码。

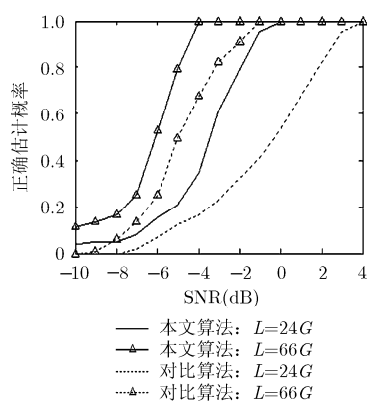


图7 信息码已知时算法对比

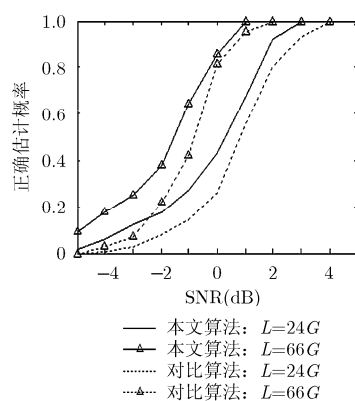


图8 信息码未知时算法对比

参考文献

- [1] ZHANG Tianqi and ZHANG Chao. An unsupervised adaptive method to eigenstructure analysis of lower SNR DS signals[J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2006, 89(6): 1943-1946. doi: 10.1093/ietcom/e89-b.6.1943.
- [2] ZHANG Tianqi and MU Aiping. A modified eigen-structure analyzer to lower SNR DS-SS signals under narrow band interferences[J]. *Digital Signal Processing*, 2008, 18(4): 526-533. doi: 10.1016/j.dsp.2007.07.002.
- [3] QIU P Y, HUANG Z T, JIANG W L, et al. Blind classification of the short-code and the long-code direct sequence spread spectrum signals[J]. *IET Signal Processing*, 2010, 4(1): 78-88. doi: 10.1049/iet-spr.2009.0033.
- [4] 王满喜, 李宏, 马刘非, 等. 低信噪比下非周期性直扩信号的

- 盲估计[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(2): 177-181. doi: 10.3969/j.issn.1001-0548.2009.02.05.
- WhANG Manxi, LI Hong, MA Yifei, *et al.* Blind estimation of lower SNR aperiodic DS signals[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2009, 38(2): 177-181. doi: 10.3969/j.issn.1001-0548.2009.02.05.
- [5] 沈斌, 王建新. 基于奇异值分解的直扩信号伪码序列及信息序列盲估计方法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(9): 2098-2103. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01692.
- SHEN Bin and WANG Jianxin. Blind estimation of the PN sequence and information sequence of a DSSS signal based on SVD[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(9): 2098-2103. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01692.
- [6] WARNER E S, MULGREW B, and GRANT P M. Triple correlation analysis of m-sequences[J]. *Electronics Letters*, 1993, 29(20): 1755-1756. doi: 10.1049/el:19931169.
- [7] 沈斌, 王建新. 窄带干扰条件下含有未知载频的直扩信号的伪码序列估计[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(7): 1556-1561. doi: 10.11999/JEIT141322.
- SHEN Bin and WANG Jianxin. Estimation of PN sequence in DSSS signals with unknown carrier frequency under narrow band interferences[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(7): 1556-1561. doi: 10.11999/JEIT141322.
- [8] 赵知劲, 李淼, 詹毅. LSC-DSSS 信号长短伪码盲估计[J]. 信号处理, 2016, 32(3): 268-275. doi: 10.16798/j.issn.1003-0530.2016.03.003.
- ZHAO Zhijin, LI Miao, and ZHAN Yi. Blind estimation of long and short PN code in LSC-DSSS signals[J]. *Journal of Signal Processing*, 2016, 32(3): 268-275. doi: 10.16798/j.issn.1003-0530.2016.03.003.
- [9] 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.
- [10] 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): 27-34. 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): 27-34. doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2015121.
- [11] FUSCO T, IZZO L, NAPOLITANO A, *et al.* On the second-order cyclostationarity properties of long-code DS-SS signals [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2006, 54(10): 1741-1746. doi: 10.1109/TCOMM.2006.881353.
- [12] 卢光跃, 叶迎晖, 孙宇, 等. 克服噪声不确定度的拟合优度检验频谱感知算法[J]. 电讯技术, 2016, 56(1): 26-31. doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2016.01.005.
- LU Guangyue, YE Yinghui, SUN Yu, *et al.* A novel anti-noise-uncertainty spectrum sensing method using goodness of fit test[J]. *Telecommunication Engineering*, 2016, 56(1): 26-31. doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2016.01.005.
- [13] LUO Jinjun, WANG Shilian, ZHANG Eryang, *et al.* Non-cooperative signal detection in alpha stable noise via Kolmogorov-Smirnov test[C]. International Congress on Image and Signal Processing (CISP), Shenyang, 2015: 1464-1468.
- [14] WANG Fanggang and WANG Xiaodong. Fast and robust modulation classification via Kolmogorov-Smirnov test[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2010, 58(8): 2324-2332. doi: 10.1109/TCOMM.2010.08.090481.
- [15] ASHWIN Lall. Data streaming algorithms for the Kolmogorov-Smirnov test[C]. IEEE International Conference on Big Data, Santa Clara, CA, USA, 2015: 95-104.
- [16] Conover W J. 实用非参数统计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006: 318-320.
- Conover W J. Practical Nonparametric Statistics[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2006: 318-320.
- [17] 廖辉荣, 李国林, 李涛. 基于三阶相关的伪码调相脉冲信号周期预估计[J]. 航天电子对抗, 2011, 27(3): 39-42. doi: 10.3969/j.issn.1673-2421.2011.03.013.
- LIAO Huirong, LI Guoling, and LI Tao. Period estimation of phase-modulated pulse signal with PN code based on third-order correlation[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2011, 27(3): 39-42. doi: 10.3969/j.issn.1673-2421.2011.03.013.
- 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。
- 强芳芳: 女, 1992年生, 硕士生, 研究方向为信号处理。
- 李 淼: 女, 1990年生, 硕士生, 研究方向为软件无线电。
- 沈 雷: 男, 1979年生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为信号检测、信号盲分离。
- 王海泉: 男, 1964年生, 教授, 硕士生导师, 研究方向为信号检测和MIMO通信。