

乘性噪声环境下基于符号秩统计量的非参伪码捕获方法

沈 锋 徐定杰 吕东泽
(哈尔滨工程大学自动化学院 哈尔滨 150001)

摘 要: 扩频系统常常工作在多径环境中, 伴随着加性噪声的同时往往还存在着乘性噪声。该文提出了一种乘性噪声环境下基于符号秩统计量的非参伪码捕获方法, 将伪码捕获等价于假设检验问题, 利用局部最佳检测算法推导出了乘性噪声环境下基于符号秩的检测统计量, 通过简化记分函数进一步给出了局部最佳秩检测器。将局部最佳秩检测器与局部最佳检测器和平方和检测器的性能进行了仿真对比, 结果表明该文所提出的捕获方法在乘性噪声环境下检测性能接近于乘性噪声环境下的局部最佳检测器, 而较平方和检测器则有较大幅度的提高。

关键词: 扩频通信; 伪码捕获; 符号秩统计量; 非参数检测; 局部最佳检测; 乘性噪声

中图分类号: TN914.42

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)08-1943-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00665

A Method of PN Code Acquisition Using Signed-rank-based Nonparametric Detector in Multiplicative Noise

Shen Feng Xu Ding-jie Lü Dong-ze

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The spread-spectrum system usually works in the multipath environment, along with the additive noise there always be some multiplicative noise. In order to solve the Pseudo-Noise (PN) code acquisition in multiplicative noise channel, a new detector using signed-rank-based nonparametric detector is proposed in this paper. Modeling the acquisition problem as a hypothesis testing problem, a detector is derived for multiplicative noise, based on signed-rank statistics using the locally optimum detection technique. Then the Locally Suboptimum Rank (LSR) detector is proposed by using approximate score functions. Numerical results show that the LSR detector can offer substantial performance improvement over the conventional squared-sum detector in multiplicative noise channels and asymptotically has almost the same performance as the locally optimum detector in multiplicative noise.

Key words: Spread-spectrum communication; Code acquisition; Signed-rank statistics; Nonparametric detector; Locally optimum detection; Multiplicative noise

1 引言

扩频通信技术因其抗干扰能力强、保密性好、能抗多径衰落等优点被广泛的应用于军民通信与导航领域中。但这些优点只有当本地伪码与接收伪码同步时才能得到。同步分为粗同步和精同步, 即信号的捕获与跟踪, 而捕获是跟踪的前提。捕获是指本地伪码序列与接收伪码对准在一定的范围内(通常在半个码片内)^[1]。根据不同的分类标准, 用于伪码捕获的检测器通常可以分别相干检测器和非相干检测器, 基于贝叶斯和 Neyman-Pearson 的检测器等等^[2-4]。在传统的参数检测器中, 需要实时估计出时变信号的方差来确定捕获门限, 往往较小的估

计偏差会导致检测器的性能大幅下降^[5-10]。为此, 近来基于符号统计量的非参检测器常常被用于伪码捕获, 其捕获门限的确定不需要对接收噪声观测量进行估计^[11,12]。另一方面, 目前直接序列扩频系统(Direct-Sequence Spread-Spectrum, DS/SS)伪码捕获的研究大多数都集中在加性噪声环境下, 即接收信号中噪声与有用信号是相加的关系。在直扩系统中由于多径信号的存在, 接收端接收的不仅仅是噪声与直达信号之和, 往往还存在乘性噪声项^[13,14], 乘性噪声是指多路径信号由于路径的复杂性引起幅值或相位的衰落, 噪声对信号的影响以乘性的形式体现在接收信号中, 因此有必要研究存在乘性噪声时的伪码捕获问题。文献[13,14]指出了通信、雷达及声纳中存在的乘性噪声, 并研究了乘性噪声下的弱信号提取, 但都局限于 1 维信号检测, 没有应用于直扩系统中的 2 维伪码捕获问题。文献[15,16]研

究了乘性噪声环境下的伪码捕获，但其采用的参数检测器实现的伪码捕获，并没有引入非参检测方法。文献[11,12]研究了基于符号秩的非参伪码捕获方法，但其没有考虑乘性噪声。

本文针对乘性噪声环境下的伪码捕获问题，提出了一种基于符号秩统计量的非参伪码捕获方法。首先利用局部最佳检测算法推导了基于符号秩的局部最佳秩检测统计量，在此基础上通过对记分函数的简化，得到了局部次佳秩检测器，最后将局部次佳秩检测器与乘性噪声环境下的局部最佳检测器和平方和检测器进行了性能对比。采用局部最佳检测主要考虑以下两个原因^[17]：首先，当输入信噪比较低时，局部最佳检测的渐进相对效率函数最大，因此其在信噪比较低时具有较好的检测性能；其次，局部最佳检测在各种复杂信道下都能够得到其检测结构，并且相对于其它检测器，如最大势检测器和贝叶斯检测器，通常易于实现。文中首先给出乘性噪声环境下接收信号模型，并将伪码捕获问题转化为假设检验问题得到了统计量观测模型；接着推导出基于局部最佳秩检测和局部次佳秩检测的统计量，并对本文所提出的捕获方法与传统检测方法进行了计算机仿真对比；最后给出了结论。

2 观测模型

引入乘性噪声后 DS/SS 系统接收信号模型可表示为

$$r(t) = s(t) + s(t)n(t) + w(t) \quad (1)$$

其中 $s(t)$ 为直达路径信号； $w(t)$ 为高斯白噪声； $n(t)$ 为独立于 $s(t)$ 的附加乘性噪声，通常情况下与高斯白噪声 $w(t)$ 相关^[13-16]。接收直达信号 $s(t)$ 可表示为

$$s(t) = \sqrt{2E}d(t - \tau T_c)c(t - \tau T_c)\cos(\omega_c t + \phi) \quad (2)$$

式中 E 为接收单个码片能量； $d(t)$ 为发射数据，不失一般性，文中假设调制数据始终为 1(i.e., $d(t) = 1$)； T_c 为码元宽度； τ 为相对 T_c 的归一化时延； $c(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} c_i p_{T_c}(t - iT_c)$ ，其中 $c_i \in \{-1, +1\}$ 为周期为 L 的伪码序列中第 i 个码片， $p_{T_c}(t)$ 为区间 $[0, T_c]$ 上的单位矩形脉冲； ω_c 为接收信号载波频率； ϕ 为接收信号载波相位， ϕ 在 $[0, 2\pi)$ 内服从均匀分布。

图 1 给出了典型的非相干伪码捕获结构，文中考虑采用单次驻留的串行捕获方法。则同相正交支路(I, Q 支路)中第 i 次采样值 X_i^I, X_i^Q 可以表示为

$$X_i^I = \int_{t_i - T_c}^{t_i} r(t)c(t - \hat{\tau}T_c)\sqrt{2}\cos(\omega_c t)dt \quad (3)$$

$$X_i^Q = \int_{t_i - T_c}^{t_i} r(t)c(t - \hat{\tau}T_c)\sqrt{2}\sin(\omega_c t)dt \quad (4)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, M$ ， M 为相关长度， $\hat{\tau}$ 为本地伪码

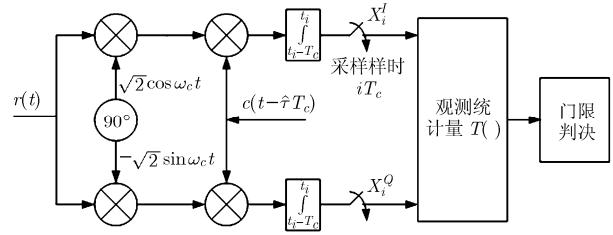


图 1 伪码捕获系统结构图

归一化时延。

伪码捕获结构就是通过将观测量 $\{X_i^I\}_{i=1}^M$ 与 $\{X_i^Q\}_{i=1}^M$ 的检测函数与捕获判决门限进行比较来验证是否捕获到直扩信号。如果小于门限，则滑动本地伪码相位重新进行判断比较直至捕获到信号。直扩系统的常规伪码捕获方式为平方和(SS)检测器

$$T_{SS}(X^I, X^Q) = \left(\sum_{i=1}^M X_i^I\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^M X_i^Q\right)^2$$

将伪码捕获对应于假设检验问题，给定观测量 $\{X_i^I\}_{i=1}^M$ 和 $\{X_i^Q\}_{i=1}^M$ ，在 H_0 和 H_1 两种状态下进行判决，其中， $H_0 : |\tau - \hat{\tau}| \geq 1$ 对应未捕获状态； $H_1 : |\tau - \hat{\tau}| < 1$ 对应捕获状态。在 H_1 状态下，本地伪码与接收伪码每个采样点相关值为 $\sqrt{E}(1 - |\delta|)$ ，其中 $\delta \in (-1, +1)$ 为本地伪码与接收伪码未对准部分的归一化值。为了讨论方便，本文假设系统捕获状态下不存在未对准部分，即 $\delta = 0$ ，则每个码相位采样点相关值为 \sqrt{E} 。在 H_0 状态下，每个相位采样点相关值等概率取 +1 或 -1，因此在 H_0 状态下，相位采样点相关值的均值为 0。结合式(3)和式(4)， H_0 和 H_1 可表示为

$$H_0 : (X_i^I = W_i^I, X_i^Q = W_i^Q), \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

$$H_1 : (X_i^I = \theta \cos \phi + \theta \cos \phi N_i^I + W_i^I, X_i^Q = \theta \sin \phi + \theta \sin \phi N_i^Q + W_i^Q), \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

进一步简化为

$$H_0 : \theta = 0 \quad (7)$$

$$H_1 : \theta > 0 \quad (8)$$

式(5)-式(8)中： $\theta = \sqrt{E}$ 为信号强度参数； $\{N_i^b\}_{i=1}^M$ 和 $\{W_i^b\}_{i=1}^M$ 分别为乘性噪声和加性噪声采样序列，其中 $b = \{I, Q\}$ 对应同相正交两支路。定义 $f_{N^I}, f_{N^Q}, f_{W^I}$ 和 f_{W^Q} 分别为 I, Q 两支路下乘性噪声和加性噪声观测量的概率密度分布； $f_{N^I W^I}, f_{N^Q W^Q}$ 分别为 (N^I, W^I) 和 (N^Q, W^Q) 的联合概率密度分布；定义 $f_{(N^I W^I, N^Q W^Q)}$ 和 f_{W^I} 分别为 H_1 和 H_0 状态下的 I, Q 支路观测量联合概率密度分布。

假定对于给定的相位 ϕ ，噪声过程的采样序列形成了互相独立的随机向量。则在正交同相支路上 $2M$ 个采样点 $\{X_i^I, X_i^Q\}$ ， $i = 1, 2, \dots, M$ 的观测量联合概率密度函数为

$$\begin{aligned}
 f_{X^I, X^Q}(x^I, x^Q) &= E_\phi \left\{ \int f_{(N^I W^I, N^Q W^Q)} dN \right\} \\
 &= E_\phi \left\{ \prod_{i=1}^N \iint f_{(n_i^I, y_i^I(\theta), n_i^Q, y_i^Q(\theta))} dn_i^I dn_i^Q \right\}
 \end{aligned} \tag{9}$$

其中 E_ϕ 为对 ϕ 取数学期望， y_i^I 和 y_i^Q 可以表示为

$$y_i^I(\theta) = x_i^I - \theta \cos \phi - n_i^I \theta \cos \phi \tag{10}$$

$$y_i^Q(\theta) = x_i^Q - \theta \sin \phi - n_i^Q \theta \sin \phi \tag{11}$$

3 局部最佳秩检测统计量

为了推导符号秩检测统计量，令 $Z_i^b = \text{sgn}(X_i^b)$ ，则 $\mathbf{Z}^b = (Z_1^b, Z_2^b, \dots, Z_M^b)$ 为观测量 $\mathbf{X}^b = (X_1^b, X_2^b, \dots, X_M^b)$ 的符号向量；定义向量 $\mathbf{Q}^b = (Q_1^b, Q_2^b, \dots, Q_M^b)$ 中的元素 Q_i^b 为 $|X_i^b|$ 在向量 $|\mathbf{X}^b| = \{|X_1^b|, |X_2^b|, \dots, |X_M^b|\}$ 中的秩；定义 $|X_{[i]}^b|$ 为向量 $|\mathbf{X}^b|$ 中的第 i 个最小值。

定义 $p(q^I, q^Q, z^I, z^Q | H_0)$ 和 $p(q^I, q^Q, z^I, z^Q | H_1)$ 为两种假设 H_0, H_1 下的 Q^I, Q^Q, Z^I, Z^Q 联合离散型机率分布函数，则 H_0 和 H_1 可表示为

$$\begin{aligned}
 H_0 : p(q^I, q^Q, z^I, z^Q | H_0) &= \Pr\{Q^I = q^I, \\
 Q^Q = q^Q, Z^I = z^I, Z^Q = z^Q | H_0\} &= \frac{1}{(2^M M!)^2} \tag{12}
 \end{aligned}$$

$$H_1 : p(q^I, q^Q, z^I, z^Q | H_1) = \int_B f_{X^I, X^Q}(x^I, x^Q) dx^I dx^Q \tag{13}$$

其中 $B = \{(x^I, x^Q) | Q^I = q^I, Q^Q = q^Q, Z^I = z^I, Z^Q = z^Q\}$ 。

参考局部最佳检测算法，局部最佳秩检测器检测统计量可表示为

$$\begin{aligned}
 T_{\text{LOR}}(X^I, X^Q) &= \frac{1}{p(q^I, q^Q, z^I, z^Q | H_0)} \\
 &\cdot \lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{d^v p(q^I, q^Q, z^I, z^Q | H_1)}{d\theta^v} \tag{14}
 \end{aligned}$$

其中 v 为 $p(q^I, q^Q, z^I, z^Q | H_1)$ 在 $\theta = 0$ 处的第 1 个非零导数项的阶数。乘性噪声环境下局部最佳秩检测器检测统计量的推导过程略，最终得到局部最佳秩检测器的结构如下

$$\begin{aligned}
 T_{\text{LOR}} &= \frac{1}{2} \left\{ \sum_{i=1}^M \sum_{j=1, j \neq i}^M Z_i^I Z_j^I \{c_1(Q_i^I, Q_j^I) + c_2(Q_i^I, Q_j^I) \right. \\
 &+ c_2(Q_j^I, Q_i^I) + c_3(Q_i^I, Q_j^I)\} \\
 &+ \sum_{i=1}^M \sum_{j=1, j \neq i}^M Z_i^Q Z_j^Q \{c_1(Q_i^Q, Q_j^Q) + c_2(Q_i^Q, Q_j^Q) \\
 &+ c_2(Q_j^Q, Q_i^Q) + c_3(Q_i^Q, Q_j^Q)\} \\
 &+ \sum_{i=1}^M \{d_1(Q_i^I) + 2d_2(Q_i^I) + d_3(Q_i^I) + d_1(Q_i^Q) \\
 &+ 2d_2(Q_i^Q) + d_3(Q_i^Q)\} \left. \right\} \tag{15}
 \end{aligned}$$

其中

$$c_1(Q_i^b, Q_j^b) = E_{H_0} \{g_1(|X_{[i]}^b|)g_1(|X_{[j]}^b|)\} \tag{16}$$

$$c_2(Q_i^b, Q_j^b) = E_{H_0} \{g_1(|X_{[i]}^b|)g_2(|X_{[j]}^b|)\} \tag{17}$$

$$c_3(Q_i^b, Q_j^b) = E_{H_0} \{g_2(|X_{[i]}^b|)g_2(|X_{[j]}^b|)\} \tag{18}$$

$$d_1(Q_i^b) = E_{H_0} \{h_1(|X_{[i]}^b|)\} \tag{19}$$

$$d_2(Q_i^b) = E_{H_0} \{h_2(|X_{[i]}^b|)\} \tag{20}$$

$$d_3(Q_i^b) = E_{H_0} \{h_3(|X_{[i]}^b|)\} \tag{21}$$

$$g_1(x_i^b) = \frac{1}{f_w(x^I, x^Q)} \times \frac{\partial f_w(x^I, x^Q)}{\partial x_i^b} \tag{22}$$

$$g_2(x_i^b) = \frac{1}{f_w(x^I, x^Q)} \times \frac{\partial(f_w(x^I, x^Q)E\{N^b | W = x^I, x^Q\})}{\partial x_i^b} \tag{23}$$

$$h_1(x_i^b) = \frac{1}{f_w(x^I, x^Q)} \times \frac{\partial^2 f_w(x^I, x^Q)}{\partial (x_i^b)^2} \tag{24}$$

$$h_2(x_i^b) = \frac{1}{f_w(x^I, x^Q)} \times \frac{\partial^2(f_w(x^I, x^Q)E\{N^b | W = x^I, x^Q\})}{\partial (x_i^b)^2} \tag{25}$$

$$h_3(x_i^b) = \frac{1}{f_w(x^I, x^Q)} \times \frac{\partial^2(f_w(x^I, x^Q)E\{(N^b)^2 | W = x^I, x^Q\})}{\partial (x_i^b)^2} \tag{26}$$

由式(12)可知，在 H_0 状态下， $(\mathbf{Q}^b = q^b, \mathbf{Z}^b = z^b)$ 的概率独立于噪声的概率密度分布，一旦给定了虚警概率，则捕获门限也就随之确定，而不需要知道观测噪声的统计量。

对于绝大多数的概率密度分布函数，记分函数 $c_1(i, j), c_2(i, j), c_3(i, j), d_1(i), d_2(i)$ 和 $d_3(i)$ 不能直接求得，而可以通过数值分析的方法获得记分函数值。这里采用一种近似方法求解记分函数，具体方法可参见文献[18]，这里直接给出近似后的记分函数

$$c_1(i, j) \cong g_1 \left(F^{-1} \left(\frac{M+i+1}{2M+2} \right) \right) g_1 \left(F^{-1} \left(\frac{M+i+1}{2M+2} \right) \right) \tag{27}$$

$$c_2(i, j) \cong g_1 \left(F^{-1} \left(\frac{M+i+1}{2M+2} \right) \right) g_2 \left(F^{-1} \left(\frac{M+i+1}{2M+2} \right) \right) \tag{28}$$

$$c_3(i, j) \cong g_2 \left(F^{-1} \left(\frac{M+i+1}{2M+2} \right) \right) g_2 \left(F^{-1} \left(\frac{M+i+1}{2M+2} \right) \right) \tag{29}$$

$$d_1(i) \cong h_1 \left(F^{-1} \left(\frac{M+i+1}{2M+2} \right) \right) \tag{30}$$

$$d_2(i) \cong h_2 \left(F^{-1} \left(\frac{M+i+1}{2M+2} \right) \right) \tag{31}$$

$$d_3(i) \cong h_3 \left(F^{-1} \left(\frac{M+i+1}{2M+2} \right) \right) \tag{32}$$

其中 $F(x)$ 为 f_w 的累积分布函数。

将近似后的记分函数代入式(15), 可得到简化记分函数后的局部次佳秩检测器。

4 仿真结果

采用蒙特-卡洛方法对平方和检测器, 文献[15,16]中提出的乘性噪声环境下的局部最佳检测器和本文提出的局部次佳秩检测器三者捕获性能进行了计算机仿真。仿真中取 $N^b = rsW^b$, (N^I, W^I) 和 (N^Q, W^Q) 分别取二元高斯变量, 并且有相同的相关系数 r , N^I, N^Q 取相同的方差 $\sigma_{N^I}^2 = \sigma_{N^Q}^2 = s^2$, W^I, W^Q 取相同的方差 $\sigma_{W^I}^2 = \sigma_{W^Q}^2 = 1$ 。

仿真中捕获门限通过虚警概率恒为 $P_{fa} = 10^{-2}$ 得到, 为缩短仿真时间, 取 $M = 50$ 。图2和图3给出了不同 r, s 值下3种检测器捕获概率随信噪比的关系; 图4给出了不同信噪比条件下3种检测器检测性能与 r, s 的关系, 图中每个仿真点仿真次数取100000次以保证仿真结果误差在1%以内。图中SS检测器、LO检测器、LSR检测器分别代表平方和检测器、乘性噪声环境下的局部最佳检测器和本文提出的局部次佳秩检测器。从图中可以看出: 3种检测器伪码捕获概率都随着信噪比的增大而增大; 随着 r, s 的增大, 乘性噪声环境下的局部最佳检测器和本文提出的局部次佳秩检测器伪码捕获概率随之增大, 而平方和检测器捕获概率则保持不变; 乘性噪声环境下的局部最佳检测器检测性能在3种检测器中是最优的, 局部次佳秩检测器的性能与局部最佳检测器性能较为接近, 随着 r, s 的增大, 局部次佳

秩检测器较平方和检测器性能提高幅度越大, 这是因为 r, s 的大小体现了检测器利用乘性噪声程度的大小, r, s 越大, 则检测统计量中利用的乘性噪声有用信息越多, 检测器检测性能也越高, 当 r, s 接近0时, 平方和检测器性能就会稍稍优于局部次佳秩检测器和局部最佳检测器, 这是因为当 r, s 接近0时, 接收信号背景噪声中乘性噪声的影响越来越小, 接收噪声接近于高斯分布, 而平方和检测器为高斯环境下的最佳检测器。

5 结论

针对乘性噪声环境下的扩频伪码捕获, 本文提出了一种基于符号秩统计量的非参伪码捕获方法。将伪码捕获转化为假设检验问题, 利用局部最佳检测算法给出了基于符号秩的伪码捕获检测统计量, 在此基础上通过对记分函数的简化, 得到了局部次佳秩检测器, 并与传统的平方和检测器和乘性噪声环境下的局部最佳检测器进行了性能比较。通过仿真比较验证了局部次佳秩检测器可以有效地实现乘性噪声环境下的伪码捕获, 且捕获性能较平方和检测器有大幅提高, 局部次佳秩检测器实现了非参伪码捕获, 其捕获性能相比于乘性噪声环境下的局部最佳检测器仅仅稍有降低。由于局部次佳秩检测器为非参检测器, 在实际应用于可以直接根据需要的虚警概率设定门限值, 而不需要通过观测噪声来确定门限。

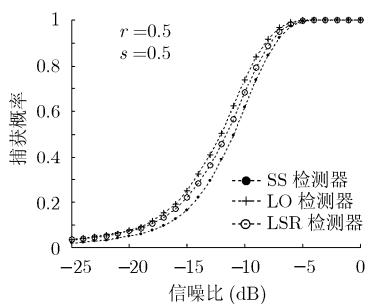


图2 3种检测器捕获概率与信噪比的关系曲线

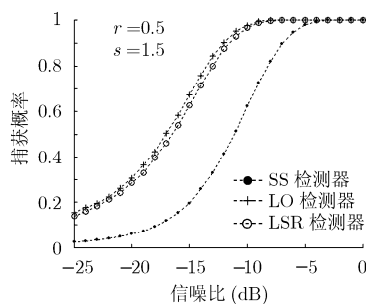


图3 3种检测器捕获概率与信噪比的关系曲线

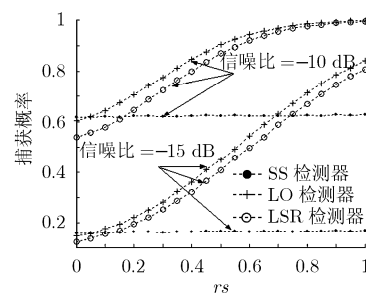


图4 不同信噪比下3种检测器捕获概率与 r, s 的关系

参考文献

- [1] Giunta G and Benedetto F. Spread-spectrum code acquisition in the presence of cell correlation [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2007, 55(2): 257-261.
- [2] Won SeungHwan and Hanzo L. Non-coherent and differentially coherent code acquisition in MIMO assisted DS-CDMA multi-path downlink scenarios [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(5): 1585-1593.

- [3] 沈锋, 孙枫, 薛冰. 一种弱相关非高斯信道下的伪码捕获方法. *系统工程与电子技术*, 2009, 31(7): 1568-1572.
- Shen Feng, Sun Feng, and Xue Bing. A method of code acquisition in weakly dependent non-Gaussian impulsive channels. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(7): 1568-1572.
- [4] Shim J, Amde M, Yun K, and Cruz R. Synchronization at low SINR in asynchronous direct sequence spread spectrum communications[C]. Second International Conference on

- Systems and Networks Communications, ICSNC 2007, Riviera, French, Aug 25–31, 2007: 26.
- [5] Roy A and Doherty J F. Signal detection in an impulsive noise environment using locally optimum detection[C]. IEEE 66th Vehicular Technology Conference, Baltimore, USA, Sept. 30–Oct. 3, 2007: 1022–1026.
- [6] Yoon S, Song I, and Kim S Y. Code acquisition for DS/SS communications in non-Gaussian impulsive channels. *IEEE Transaction on Communication*, 2004, 52(2): 187–190.
- [7] Kim C J, Lee H J, and Lee H S. Adaptive acquisition of PN sequences for DSSS communications. *IEEE Transaction on Communication*, 1998, 46(8): 993–996.
- [8] Zarrabizadeh M H and Sousa E S. A differentially coherent PN code acquisition receiver for CDMA systems. *IEEE Transaction on Communication*, 1997, 45(11): 1456–1465.
- [9] Kim I J, Park S R, Song I, Lee J, Kwon H, and Yoon S. Detection schemes for weak signals in first order moving average of impulsive noise. *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, 2007, 56(1): 126–133.
- [10] Blum R S. Necessary conditions for optimum distributed sensor detectors under the neyman-pearson criterion. *IEEE Transaction on Information Theory*, 1996, 42(5): 990–994.
- [11] Kim H G, Song I, Kim S Y, and Lee J. PN code acquisition using nonparametric detectors in DS/CDMA systems. *Signal Processing*, 2000, 80(3): 731–736.
- [12] Kim H G, Song I, Yoon S, and Kim S Y. PN code acquisition using Signed-Rank-Based Nonparametric detector in DS/SS systems. *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, 2001, 50(7): 1151–1157.
- [13] Song I and Kassam S A. Locally optimal detection of signals in a Generalized observation model: the known signal case. *IEEE Transaction on Information Theory*, 1990, 36(3): 502–515.
- [14] Song I and Kassam S A. Locally optimal detection of signals in a Generalized observation model: the random signal case. *IEEE Transaction on Information Theory*, 1990, 36(3): 516–530.
- [15] 沈锋, 徐定杰, 薛冰. 乘性噪声环境下基于局部最佳检测器的伪码捕获方法. *电子与信息学报*, 2009, 32(8): 1952–1956.
- Shen Feng, Xu Ding-jie, and Xue Bing. PN code acquisition based on the locally optimum detector in multiplicative noise channels. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 32(8): 1952–1956.
- [16] Shen Feng and Xu Ding-jie. Direct sequence code acquisition in multiplicative and non-Gaussian noises. *International Journal of Electronics*, 2009, 96(5): 479–489.
- [17] Kim J, Park S R, Song I, Lee J, Kwon H, and Yoon S. Detection schemes for weak signals in first order moving average of impulsive noise[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2007, 56(1): 126–140.
- [18] Song I and Kassam S A. Locally optimum rank detection of correlated random signals in additive noise. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1992, 38(7): 1311–1322.
- 沈 锋: 男, 1981年生, 讲师, 研究方向为卫星导航、微弱信号检测.
- 徐定杰: 男, 1966年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为扩频通信、通信和导航抗干扰技术.
- 吕东泽: 女, 1986年生, 博士生, 研究方向为微弱信号检测.