

# 基于四阶累积量的 DSSS/QPSK 信号检测方法研究

赵知劲<sup>1,2</sup>, 邬佳<sup>2</sup>, 徐春云<sup>2</sup>, 张 鑫<sup>2</sup>

(1. 杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江杭州 310018;

2. 西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 陕西西安 710072)

**摘 要:** 根据高斯白噪声的四阶累积量恒为零这一特性,研究了 DSSS/QPSK 信号的四阶累积量,提出了基于四阶累积量不同切片  $c_{4,x}(0,0,0)$ 、 $c_{4,x}(\tau, \tau)$ 、 $c_{4,x}(0, \tau)$  和  $c_{4,x}(0,0, \tau)$  的时域和频域检测方法. 仿真结果表明,频域检测方法性能优于时域检测方法;综合考虑检测性能和实现难度,基于  $c_{4,x}(0,0, \tau)$  的频域检测方法最好,在虚警概率为 1%、信噪比为 -11dB 时,检测概率仍可达到 50% 以上. 没有引入大规模的矩阵运算,运算量小,易于实现.

**关键词:** 四阶累积量; 直接序列扩频信号; 信号检测; 无码检测

**中图分类号:** TN911.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 06-1046-04

## The Study on the Detection Methods of DSSS/QPSK Signal Based on the Fourth-Order Cumulants

ZHAO Zhi-jin<sup>1,2</sup>, WU Jia<sup>2</sup>, XU Chun-yun<sup>2</sup>, ZHANG Xun<sup>2</sup>

(1. Telecommunication School, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;

2. National Key Lab of Integrated Service Network, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** According to the fact that the fourth-order cumulant of the Gaussian White Noise is equal to zero, the fourth-order cumulant of the DSSS/QPSK signal is studied and the time domain and frequency domain detection methods based on the fourth-order cumulant different slices  $c_{4,x}(0,0,0)$ 、 $c_{4,x}(\tau, \tau)$ 、 $c_{4,x}(0, \tau)$  and  $c_{4,x}(0,0, \tau)$  are proposed. Experimental results show that the detection performance of the method in frequency domain is better than that of the method in time domain. Trading off the detection performance and realization difficulty, the frequency domain detection method based on  $c_{4,x}(0,0, \tau)$  is the best. When the false alarm probability is set to 1%, its detection probability reaches above 50% at SNR -11dB. The proposed methods don't involve extensive matrix operations, their computation complexities are low, and they are easy to implement.

**Key words:** fourth-order cumulant; direct sequence spread spectrum; signal detection; detection without codes

### 1 引言

直接序列扩频(DSSS)信号的功率谱密度较低,淹没背景噪声中,即信噪比一般都小于 0dB,因此,对 DSSS 信号的检测是现代军事侦察中必须研究和解决的问题<sup>[1]</sup>. 目前,在 DSSS 信号检测中,传统的微弱信号检测方法,如能量法<sup>[2]</sup>、平方法<sup>[3]</sup>等,已不能满足实际信号的检测要求;常规的延迟相乘检测法<sup>[4]</sup>需要知道信号的先验知识,在非协作通信情况下其检测性能急剧下降;相关积累法<sup>[5]</sup>对信号做相关处理,并用较长的积累时间来消除噪声影响,所需数据较长,计算量和存储空间较大,不适于实际应用. 谱相关法<sup>[6~8]</sup>能够完成 -5dB 下的 DSSS 信号检测和参数估计,但它的检测速度慢,实时实现较为困难. 上述方法几乎都是主要考虑对 BPSK 调制的 DSSS 信号的检测,而在数字 CDMA 蜂窝通信系统中普遍采用 QPSK 调制的 DSSS 信号,以上方法难以检测低信噪比下的 DSSS/QPSK 信号,因此迫切需要研究对

DSSS/QPSK 信号的有效检测. 随机过程理论指出,高阶统计量作为一种非常有力的随机信号分析工具,具有两个显著的优点<sup>[9]</sup>:其一,在理论上,高阶累积量能够完全抑制任何高斯噪声;其二,高阶统计量蕴含比二阶统计量更丰富的信息. 基于这两个优点,本文通过分析 DSSS/QPSK 信号的四阶累积量,提出了基于四阶累积量切片的 DSSS 信号时域和频域检测方法,这两类检测方法不需要信号的任何先验信息,运算量小,具有一定的工程应用意义.

### 2 理论基础

假设 DSSS/QPSK 信号模型为

$$s(t) = \sqrt{P}c_i(t) \cos(2f_0t + \theta) + \sqrt{P}c_q(t) \sin(2f_0t + \theta) \quad (1)$$

其中:  $P$  是信号功率,  $c_i(t)$ 、 $c_q(t) \in \{-1, 1\}$  是经过伪随机序列调制后的信息序列, 互相统计独立,  $f_0$  是载波频率,  $\theta$  是在  $[0, 2\pi]$  内均匀分布的随机变量.

根据高阶统计量特性, 推导得到 DSSS/QPSK 信号

收稿日期: 2005-10-24; 修回日期: 2006-12-10

基金项目: 电科院预研基金项目 (No. 41101040102)

的四阶累积量为

$$\begin{aligned} c_{4s}(\tau_1, \tau_2, \tau_3) &= m_{4s}(\tau_1, \tau_2, \tau_3) - c_{2s}(\tau_1) c_{2s}(\tau_3 - \tau_2) \\ &- c_{2s}(\tau_2) c_{2s}(\tau_3 - \tau_1) - c_{2s}(\tau_3) c_{2s}(\tau_2 - \tau_1) \\ &= \frac{P^2}{4} m_{4c}(\tau_1, \tau_2, \tau_3) [\cos 2f_0(\tau_1 + \tau_2 - \tau_3) \\ &+ \cos 2f_0(\tau_1 + \tau_3 - \tau_2) + \cos 2f_0(\tau_2 + \tau_3 - \tau_1)] \\ &- P^2 R_c(\tau_1) R_c(\tau_3 - \tau_2) \cos 2f_0(\tau_1) \cos 2f_0(\tau_3 - \tau_2) \\ &- P^2 R_c(\tau_2) R_c(\tau_3 - \tau_1) \cos 2f_0(\tau_2) \cos 2f_0(\tau_3 - \tau_1) \\ &- P^2 R_c(\tau_3) R_c(\tau_2 - \tau_1) \cos 2f_0(\tau_3) \cos 2f_0(\tau_2 - \tau_1) \end{aligned} \quad (2)$$

其中,

$$\begin{aligned} m_{4c}(\tau_1, \tau_2, \tau_3) &= E\{c_i(t) c_i(t + \tau_1) c_i(t + \tau_2) c_i(t + \tau_3)\} \\ &= E\{c_q(t) c_q(t + \tau_1) c_q(t + \tau_2) c_q(t + \tau_3)\} \end{aligned}$$

考虑二元假设检验问题  $H_1: x(t) = s(t) + n(t)$ ,  $H_0: x(t) = n(t)$ , 其中,  $s(t)$  为 DSSS/QPSK 信号,  $n(t)$  为零均值的高斯白噪声, 且与  $s(t)$  相互独立.

在  $H_1$  假设下, 得到接收信号的四阶累积量为

$$\begin{aligned} c_{4x}(\tau_1, \tau_2, \tau_3) &= c_{4s}(\tau_1, \tau_2, \tau_3) + c_{4n}(\tau_1, \tau_2, \tau_3) \\ &= c_{4s}(\tau_1, \tau_2, \tau_3) \quad 0 \end{aligned} \quad (3)$$

在  $H_0$  假设下, 得到接收信号的四阶累积量为

$$c_{4x}(\tau_1, \tau_2, \tau_3) = c_{4n}(\tau_1, \tau_2, \tau_3) = 0 \quad (4)$$

比较式(3)和式(4), 发现高斯白噪声的四阶累积量恒为零, 直扩加噪信号的四阶累积量不为零, 于是可以利用四阶累积量  $c_{4x}(\tau_1, \tau_2, \tau_3)$  作为检测统计量, 对 DSSS 信号进行检测.

### 3 时域检测方法

考虑到四阶累积量估计的复杂度和工程实现, 本文仅考虑 DSSS/QPSK 信号四阶累积量的四种切片方式, 以使检测方法具有应用价值.

(1)  $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 0$  时, 四阶累积量为

$$c_{4x}(0, 0, 0) = m_{4x}(0, 0, 0) - 3c_{2x}^2(0) \quad (5)$$

(2)  $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau$  时, 四阶累积量为

$$c_{4x}(\tau, \tau, \tau) = m_{4x}(\tau, \tau, \tau) - 3c_{2x}(0) c_{2x}(\tau) \quad (6)$$

(3) 此时, 分三种情况:  $\tau_1 = 0, \tau_2 = \tau_3 = \tau$ 、 $\tau_2 = 0, \tau_1 = \tau_3 = \tau$  和  $\tau_3 = 0, \tau_1 = \tau_2 = \tau$ . 根据式(2)得到的  $c_{4x}(0, \tau, \tau)$ ,  $c_{4x}(\tau, 0, \tau)$  和  $c_{4x}(\tau, \tau, 0)$  在数值上是相等的, 所以仅考虑一种情况. 在分析检测性能时, 也采用其中一种形式, 四阶累积量为

$$c_{4x}(0, \tau, \tau) = m_{4x}(0, \tau, \tau) - c_{2x}^2(0) - 2c_{2x}^2(\tau) \quad (7)$$

(4)  $\tau_1 = \tau_2 = 0, \tau_3 = \tau$  时, 也考虑一种情况, 四阶累积量为

$$c_{4x}(0, 0, \tau) = m_{4x}(0, 0, \tau) - 3c_{2x}(0) c_{2x}(\tau) \quad (8)$$

在实际信号处理过程中, 对四阶累积量的有偏估计公式为

$$\hat{c}_{4x}(0, 0, 0) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x^4(n) - 3 * \left( \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x^2(n) \right)^2 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \hat{c}_{4x}(\tau, \tau, \tau) &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-\tau} x(n) * x^3(n + \tau) \\ &- 3 * \left( \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x^2(n) \right) * \left( \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-\tau} x(n) * x(n + \tau) \right) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \hat{c}_{4x}(0, \tau, \tau) &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-\tau} x^2(n) * x^2(n + \tau) \\ &- \left( \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x^2(n) \right)^2 - 2 * \left( \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-\tau} x(n) * x(n + \tau) \right)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \hat{c}_{4x}(0, 0, \tau) &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-\tau} x^3(n) * x(n + \tau) \\ &- 3 * \left( \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x^2(n) \right) * \left( \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-\tau} x(n) * x(n + \tau) \right) \end{aligned} \quad (12)$$

由式(9)~(12)对检测统计量  $c_{4x}(0, 0, 0)$ 、 $c_{4x}(\tau, \tau, \tau)$ 、 $c_{4x}(0, \tau, \tau)$  和  $c_{4x}(0, 0, \tau)$  近似估计后, 与事先确定好的门限  $T_D$  进行比较判决. 若估计值大于  $T_D$ , 则判断 DSSS 信号存在, 反之亦然. 在这类检测方法中, 计算特定延迟数  $\tau$  下的四阶累积量, 没有涉及到频域变换, 可以简称为基于四阶累积量的 DSSS 信号时域检测法.

下面仿真分析这类检测方法. 实验中, DSSS/QPSK 信号由仿真软件 ADS 2003 产生, 设置实验参数为: 信息码速率 7.87 Kbps; 伪码速率为 1Mbps, 伪随机序列选用长度为 127 的 m 序列, 采样频率为 600MHz, 经过载波二次调制后, 一个载频周期内的采样点数  $N$  为 20.

检测统计量为  $c_{4x}(\tau, \tau, \tau)$ 、 $c_{4x}(0, \tau, \tau)$  和  $c_{4x}(0, 0, \tau)$  时, 不同信噪比下, 检测概率  $P_D$  与延迟数  $\tau$  和一个载频周期内的采样点数  $N$  的关系分别如图 1(a)~(c) 所示.

由图 1(a)~(c) 可见, 当延迟数  $\tau$  取  $N/4$  的偶数倍时, 检测性能最好; 取  $N/4$  的奇数倍时, 检测性能最差. 而且当延迟数  $\tau$  取  $N/4$  的偶数倍, SNR = -5dB 时, 基于非对角切片  $c_{4x}(0, \tau, \tau)$  的检测概率最大, 即检测性能最好, 基于  $c_{4x}(\tau, \tau, \tau)$  和  $c_{4x}(0, 0, \tau)$  的检测性能要略差一点.

以检测性能最好的检测统计量  $c_{4x}(0, \tau, \tau)$  为例, 当  $N$  取其它值时, 检测性能如图 2(a)~(c) 所示.

观察图 2 可见, 当  $N$  取其他值时, 仍然存在上述检测特性, 可以根据此特性确定延迟数  $\tau$  的取值. 在本文中, 综合考虑检测性能和实现的难度, 取  $N$ , 即  $\tau = N$  = 20. 确定延迟数取值后, 以检测性能最好的统计量  $c_{4x}(0, \tau, \tau)$  为例, 仿真分析这种检测器的工作特征 (ROC) 曲线. 如果给定虚警概率  $P_F$ , 就可以由纽曼-皮尔逊准则<sup>[10]</sup> 确定相应的门限  $T_D$ , 从而得到检测概率  $P_D$ . 在这类检测方法中, 较难从理论分析中直接得到  $P_F$  与  $T_D$  及  $P_D$  的关系, 由计算机仿真得到的  $P_F$  与  $T_D$  的关系曲线如图 3(a) 所示,  $P_F$  与  $P_D$  的关系曲线如图 3(b) 所示.

由图 3(a) 和 (b) 可见, 判决门限的取值对虚警概率

和检测概率有较大的影响,  $T_D$  减小时,  $P_F$  增大,  $P_D$  增大, 即  $T_D$  与  $P_F$  和  $P_D$  成反比关系; 输入信噪比越大,  $P_D$  越大, 检测性能越好. 实际系统中, 希望  $P_F$  越小越好, 在本文中, 取  $P_F$  为 1%.

根据给定的虚警概率, 确定各个切片的判决门限后, 仿真分析这类检测方法. 检测 200 组数据, 得到检测统计量为  $c_{4x}(0, 0, 0)$ 、 $c_{4x}(\tau, \tau, \tau)$ 、 $c_{4x}(0, \tau, \tau)$  和  $c_{4x}(0, 0, \tau)$  时的检测性能, 如图 4 所示.

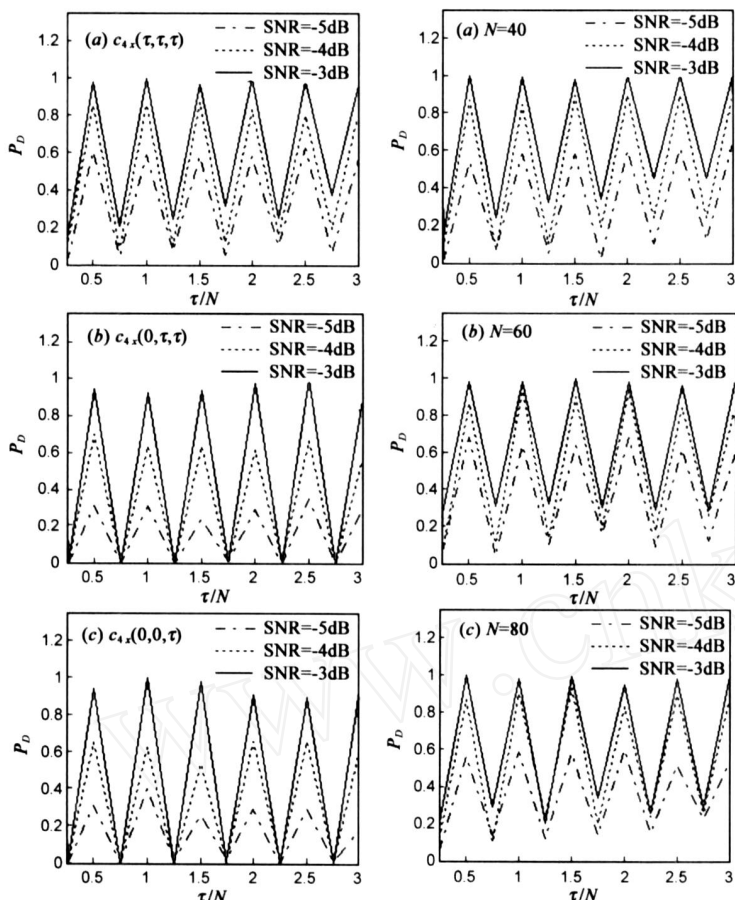
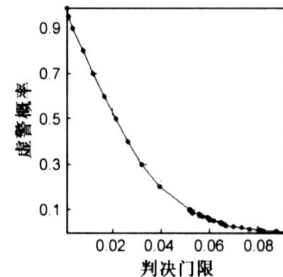
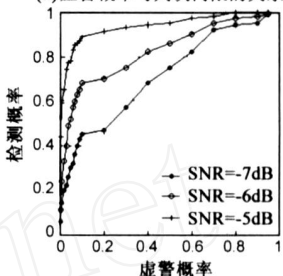


图 1 基于四阶累积量的 DSSS 信号检测方法性能与延迟数  $\tau$  的关系

图 2 不同  $N$  下, 检测统计量  $c_{4x}(0, \tau, \tau)$  的检测性能与延迟数  $\tau$  的关系



(a) 虚警概率与判决门限的关系



(b) 检测概率与虚警概率的关系

图 3 基于  $c_{4x}(0, \tau, \tau)$  的检测方法 ROC 曲线

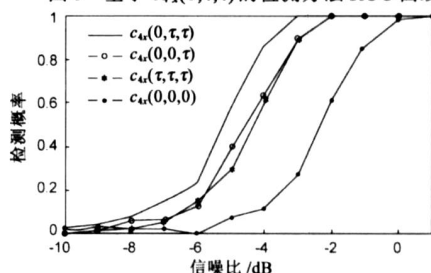


图 4  $c_{4x}(0, 0, 0)$ 、 $c_{4x}(\tau, \tau, \tau)$ 、 $c_{4x}(0, \tau, \tau)$  和  $c_{4x}(0, 0, \tau)$  在时域中的检测性能比较

从图 4 可以看出, 在这四种检测方法中,  $c_{4x}(0, \tau, \tau)$  的检测性能最好, 当信噪比为 -5dB 时, 检测概率等于 60%, 而其它三种方法的检测概率已低于 40%.

### 4 频域检测方法

在时域检测中, 当信噪比低于 -6dB 时, 检测性能变差. 由式(2)求得:

$$c_{4x}(\tau, \tau, \tau) = \left[ \frac{3}{4} P^2 m_{4c}(\tau, \tau, \tau) - 3 P^2 R_c(0) R_c(\tau) \right] \cos(2 f_0 \tau) = -\frac{9}{4} P^2 R_c(\tau) \cos(2 f_0 \tau) \quad (13)$$

$$c_{4x}(0, \tau, \tau) = \left[ \frac{P^2}{4} m_{4c}(0, \tau, \tau) - P^2 R_c^2(\tau) \right] \cos(4 f_0 \tau) + \frac{1}{2} P^2 m_{4c}(0, \tau, \tau) - P^2 R_c^2(\tau) - P^2 R_c^2(0) = \left[ \frac{1}{4} P^2 - P^2 R_c^2(\tau) \right] \cos(4 f_0 \tau) - P^2 R_c^2(\tau) - \frac{1}{2} P^2 \quad (14)$$

$$c_{4x}(0, 0, \tau) = \left[ \frac{3}{4} P^2 m_{4c}(0, 0, \tau) - 3 P^2 R_c(0) R_c(\tau) \right] \cos(2 f_0 \tau) = -\frac{9}{4} P^2 R_c(\tau) \cos(2 f_0 \tau) \quad (15)$$

由式(13)~(15)可见, DSSS 信号的四阶累积量切片  $c_{4x}(0, \tau, \tau)$  中存在载波的二倍频分量  $\cos(4 f_0 \tau)$ ,  $c_{4x}(\tau, \tau, \tau)$  和  $c_{4x}(0, \tau, \tau)$  中存在载频分量  $\cos(2 f_0 \tau)$ , 这三种切片累积量的频谱如图 5 所示, 其中仿真数据同前. 因此可得频域检测方法为: 先估计出累积量切片  $c_{4x}(\tau, \tau, \tau)$ 、 $c_{4x}(0, \tau, \tau)$  和  $c_{4x}(0, 0, \tau)$ ; 然后对切片作频谱分析, 检测出频谱图上的峰值; 最后与门限进行比较, 从而判断是否存在 DSSS 信号.

根据给定的虚警概率(1%), 分别确定三种切片的频域检测方法的门限, 这三种切片的频域检测方法性能如图 6 所示.

从图 6 可以看出, 频域检测中, 基于  $c_{4x}(0, 0, \tau)$  和

$c_{4x}(\tau, \tau, \tau)$  的检测方法性能比较好,且性能接近,在信噪比为 -11dB 时,检测概率仍可达到 50% 以上,此时基于  $c_{4x}(0, \tau, \tau)$  检测方法的检测概率已接近于 0. 这可由

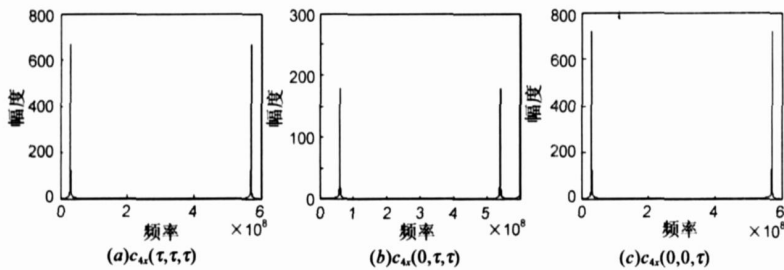


图 5 四阶累积量切片的频谱分析

比较时域检测方法和频域检测方法的检测性能,可见频域检测的性能更好些,相对于时域检测提高了约 6dB;考虑到实现的简单性,可以采用  $c_{4x}(0, 0, \tau)$  作为检测统计量的频域检测方法. 上述两类检测方法仅利用信号的四阶累积量,均未利用任何接收信号的载频、扩频码参数等先验信息,因此属于无码检测.

### 5 结束语

本文通过对 DSSS/QPSK 信号四阶累积量的分析,提出了基于四阶累积量峰值  $c_{4x}(0, 0, 0)$  和不同切片  $c_{4x}(\tau, \tau, \tau)$ 、 $c_{4x}(0, \tau, \tau)$ 、 $c_{4x}(0, 0, \tau)$  的 DSSS 信号时域和频域检测方法. 仿真结果表明,频域检测方法性能优于时域检测方法,其中基于  $c_{4x}(0, 0, \tau)$  的频域检测方法计算简单,性能高,是这七种检测方法中最佳的一种方法.

### 参考文献:

[1] Simon M, Omura J, Scholtz R, Levitt B. Spread Spectrum Communications[M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1994.

[2] Urkowitz H. Energy detection of unknown deterministic [J]. Proc IEEE, 1967, 55(4): 523 - 531.

[3] Hill D A, Bodie J B. Carrier detection of PSK signals [J]. IEEE Trans on Commun, 2001, 49(3): 487 - 496.

[4] Reed D E, Wickert M A. Minimization of detection of symbol rate spectral lines by delay and multiply receivers [J]. IEEE Trans Commun, 1988, 36(1): 118 - 120.

[5] 孟建, 胡来招. 直扩信号检测的相关积累技术 [J]. 电子对抗技术, 2001, 16(2): 31 - 35.

Meng Jian, Hu Lai-zhao. Correlation and accumulation technology for the DSSS signal detection [J]. Electronic Warfare Technology, 2001, 16(2): 31 - 35. (in Chinese)

[6] Gardner W A, Spooner C M. Signal interception: performance advantages of cyclic-feature detectors [J]. IEEE Trans Commun, 1992, 40(1): 149 - 149.

[7] 黄春琳, 柳征, 姜文利, 周一宇. 基于循环谱包络的扩谱直序信号的码片时宽、载频、幅度估计 [J]. 电子学报, 2002, 30(9): 1353 - 1356.

图 5 (a) ~ (c) 看出其原因, 因为  $c_{4x}(0, 0, \tau)$  和  $c_{4x}(\tau, \tau, \tau)$  的频谱几乎相同, 而  $c_{4x}(0, \tau, \tau)$  在  $2f_0$  处的谱峰小于前两个在  $f_0$  处的频谱值.

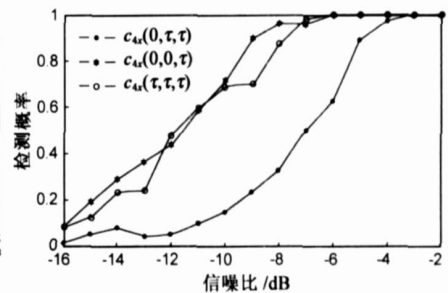


图 6  $c_{4x}(\tau, \tau, \tau)$ 、 $c_{4x}(0, \tau, \tau)$  和  $c_{4x}(0, 0, \tau)$  在频域中的检测性能比较

Huang Chun-lin, Liu Zheng, Jiang Wen-li, Zhou Yi-yu. Chip width carrier frequency and amplitude estimation of DS signal based on cyclic spectrum amplitude [J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(9): 1353 - 1356. (in Chinese)

[8] 金艳, 姬红兵, 罗军辉. 一种基于循环统计量的直扩信号检测与参数估计方法 [J]. 电子学报, 2006, 34(4): 634 - 637.

Jin Yan, Ji Hong-bing, Luo Jun-hui. A cyclic-cumulant based method for DS-SS signal detection and parameter estimation [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(4): 634 - 637. (in Chinese)

[9] 张贤达. 序列分析——高阶统计量方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.

Zhang Xianda. Time Series Analysis—Higher-Order Statistics Method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999. (in Chinese)

[10] 赵树杰, 赵建勋. 信号检测与估计理论 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

Zhao Shur-jie, Zhao Jian-xun. Signal Detection and Estimation Theory [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)

### 作者简介:



赵知劲 女, 1959 年生于浙江宁波, 教授、博士生导师, 1984 年 7 月毕业于西安电子科技大学信号、电路与系统专业, 获工学硕士学位. 发表学术论文六十多篇, 获省部级科技进步三等奖二项, 浙江省教育厅科技进步二、三等奖各一项. 主要研究方向为通信与语音信号处理.

E-mail: zhaozj03@hdu.edu.cn



邬佳 女, 1982 年生于浙江宁波, 杭州电子科技大学通信工程学院硕士研究生. 主要研究方向为扩频信号检测与参数估计.

E-mail: wujia86253705@163.com