

一种基于循环统计量的直扩信号检测 与参数估计方法

金 艳, 姬红兵, 罗军辉

(西安电子科技大学工程学院, 陕西西安 710071)

摘 要: 本文利用循环统计量检测循环平稳性的特性, 将渐近最优 χ^2 检验方法推广到直扩信号的盲检测, 提出了一种基于循环统计量的直扩信号检测方案; 理论上推导了直扩信号二阶循环统计量的表达式, 分析了时间间隔的选取对二阶循环统计量估计循环频率的影响, 据此提出了基于循环统计量的直扩信号载频和 chip 速率等参数的估计新方法. 该方法避免了多维搜索, 且不需要信号的伪码序列和各频率参数等先验信息, 可实现信号的“盲”检测和“盲”参数估计. 仿真实验证明了本文方法的有效性.

关键词: 直扩信号 检测; 参数估计; 循环统计量; 循环平稳

中图分类号: TN 911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 04-0634-04

A Cyclic-Cumulant Based Method for DS-SS Signal Detection and Parameter Estimation

JIN Yan, JI Hong-bing, LUO Jun-hui

(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract A cyclic-cumulant based DS-SS (Direct Sequence Spread Spectrum) signal detection scheme is developed by extending the asymptotically optimal chi-squared test for cyclostationarity to DS-SS signal detection. The explicit formula of the second-order cyclic-cumulant is derived, and the influence of time interval on the cycle-frequency estimation from the cyclic-cumulant is analyzed. On the base of this, a new cyclic-cumulant based DS-SS signal parameter estimation method is proposed, which can perform blind detection and blind parameter estimation without a priori knowledge of pseudorandom sequence and frequency parameters. Moreover, the method also avoids multidimensional searching in parameter estimation. Simulation results have proved the validity of the method.

Key words direct sequence spread spectrum; signal detection; parameter estimation; cyclic-cumulant; cyclostationarity

1 引言

扩频通信技术由于具有低功率谱密度发射的隐蔽性, 伪随机编码的保密性, 以及信号相关处理的抗干扰性等良好性能, 使得扩频通信技术得到了越来越广泛的应用^[1]. 然而, 正是这些特性给非协作情况下扩频通信信号的检测、参数估计等带来了很大的困难, 使得传统的能量检测法不再适用于扩频通信信号的检测^[2]. 直接序列扩频 (DS-SS) 通信是扩频通信的一种主要方式, 寻求有效的直扩信号检测及参数估计方法成为近年来受到广泛关注的研究课题. 在信号检测中, 由于常规的相关检测法需要信号的

先验知识, 因而在非协作信号情况下其检测性能急剧下降; 现代谱估计法可提取多种信号的频谱特征信息, 且不需要很大的数据量, 但是其中应用较广的相关频谱估计、最大熵谱估计等方法在低信噪比情况下检测性能恶化. Gardner等^[2~4]对循环平稳信号的谱相关理论进行了系统深入的研究, 虽然理论上这种方法可用于直扩信号的检测和参数估计^[5,6], 但由于谱相关法所需数据较长, 其计算量和存储空间较大, 不适于实际应用. 詹亚锋等^[7]提出了利用自相关函数进行累加的方法来估计直扩信号的频率参数, 但是该方法对数据样本点数的要求较高. 本文利用循环统计量检测循环平稳性的特性, 将Dandawate等^[8,9]提

出的渐近最优 χ^2 检验方法推广到直扩信号的盲检测, 提出了一种基于循环统计量的直扩信号检测方案; 理论推导了直扩信号二阶循环统计量 $R_s(\alpha; \tau)$ 表达式, 分析了时间间隔 τ 的选取对从 $R_s(\alpha; \tau)$ 估计循环频率的影响, 据此提出了一种直扩信号的载频、chip 速率等参数的盲估计方法, 可实现较低信噪比下直扩信号的“盲”检测和“盲”参数估计。

2 基于二阶循环统计量的直扩信号检测

有限长观测数据 $\{x(t)\}_{t=0}^{T-1}$ 中检测直扩信号 $s(t)$ 的问题, 即为下面的二元假设检验

$$\begin{aligned} H_0: x(t) &= n(t) \\ H_1: x(t) &= s(t) + n(t) \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $n(t)$ 为平稳噪声。由于直扩信号为循环平稳信号, 这类信号与平稳信号的区别在于前者包含有一族非零的循环频率, 而后者不存在非零的循环频率^[2]。由此, 可以通过判定非零循环频率的存在与否来检测 $x(t)$ 中的直扩信号。根据循环平稳理论^[2-4], 由二阶循环统计量可判定信号中是否存在非零循环频率。

假设 $x(t)$ 中包含有直扩信号, 则 $x(t)$ 为循环平稳过程, 其二阶时变相关函数 $R_x(t; \tau) = E\{x(t)x(t+\tau)\}$ 为时间 t 的周期函数, 对应的 Fourier 级数展开为

$$R_x(t; \tau) = \sum_{\alpha \in A} R_x(\alpha; \tau) e^{j2\pi\alpha t} \quad (2)$$

其中 $R_x(\alpha; \tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} (1/T) \sum_{t=0}^{T-1} R_x(t; \tau) e^{-j2\pi\alpha t}$ 为 $x(t)$ 的二阶循环统计量, α 为循环频率, 且满足 $A = \{\alpha; R_x(\alpha; \tau) \neq 0\}$ 。因此, 若 α 满足 $R_x(\alpha; \tau) \neq 0$, 则可判定 α 为循环频率; 进一步, 若还满足 $\alpha \neq 0$, 则可判定 $x(t)$ 中含有直扩信号。 $R_x(\alpha; \tau)$ 的一致估计式为

$$\hat{R}_x(\alpha; \tau) = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} x(t)x(t+\tau) e^{-j2\pi\alpha t} \quad (3)$$

实际中, 由于有限数据长度的影响, 即使 α 不是循环频率, $R_x(\alpha; \tau)$ 也不会等于零。因此无法直接由 $R_x(\alpha; \tau)$ 判定对应的 α 是否为循环频率。为此, 本文将 Dandawate 等^[8-9] 提出的用于检测循环频率的渐近最优 χ^2 检验方法推广到直扩信号的盲检测, 来构造一种可行的 α 判别方案。

由式 (3) 中的循环统计量估计 $R_x(\alpha; \tau)$ 构造二维行向量

$$R_x^{(T)} = [Re\{R_x^{(T)}(\alpha; \tau)\}, Im\{R_x^{(T)}(\alpha; \tau)\}] \quad (4)$$

其中 $Re\{\cdot\}$ 和 $Im\{\cdot\}$ 分别表示实部和虚部。再由 $R_x^{(T)}$ 构造检验统计量

$$\Upsilon_R = \mathbf{TR}_x^{(T)} \hat{\Sigma}_R^{-1} R_x^{(T)'} \quad (5)$$

其中 $\hat{\Sigma}_R$ 为 $R_x^{(T)}$ 的协方差矩阵估计, $R_x^{(T)'}$ 为 $R_x^{(T)}$ 的转置, $\hat{\Sigma}_R^{-1}$ 为求广义逆, 其具体表达式参见文献^[9]。

无论数据 $\{x(t)\}_{t=0}^{T-1}$ 服从何种分布, $R_x^{(T)}$ 均服从渐近正态分布, 那么当 α 不是循环频率时, $R_x^{(T)}$ 服从均值为 0 的渐近正态分布, 因此检验统计量 Υ_R 服从自由度为 2 的 χ^2 分

布^[9]。若给定虚警概率 P_{fa} , 则有

$$P_{fa} = \Pr\{\Upsilon_R \geq \Gamma | H_0\} = \Pr\{\chi^2 \geq \Gamma\} \quad (6)$$

式中 Γ 为门限, 其值可由中心化 χ^2 分布表查得。这样判定 $x(t)$ 中是否含有直扩信号的问题即转化为下面的假设检验问题

$$\begin{cases} H_0: x(t) = n(t) & \Upsilon_R < \Gamma \\ H_1: x(t) = s(t) + n(t) & \Upsilon_R \geq \Gamma, \text{ 且 } \alpha \text{ 不仅为 } 0 \end{cases} \quad (7)$$

据此, 可以得出基于二阶循环统计量的直扩信号检测方案, 如图 1 所示。由上可见, 这种基于二阶循环统计量的直扩信号检测方案不需要直扩信号的伪码序列和各频率参数等先验信息, 因此, 该方法可实现直扩信号的盲检测。

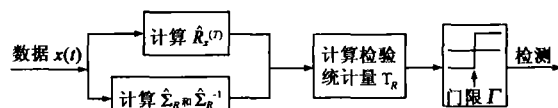


图 1 基于二阶循环统计量的直扩信号检测方案

3 基于二阶循环统计量的直扩信号参数估计

表征直扩信号的主要参数有载频、chip 速率、伪码周期等。由于伪码周期一般都非常长, 实际中很难获取足够长的数据, 因此也就无法检测出伪码周期。本文主要研究对直扩信号的载频和 chip 速率等参数的估计。下面针对实际应用中应用广泛的直扩 BPSK 信号, 研究用循环统计量估计直扩信号参数的方法。

3.1 直扩信号的二阶循环统计量表达式推导

直扩 BPSK 信号可建模为^[4]

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} q(t - nT_c - t_0) \cos(2\pi f_0 t + \theta_n + \phi_0) \quad (8)$$

其中 $q(t)$ 为伪码序列, T_c 为 chip 时宽, f_0 为载频, θ_n 为二元信息序列, 等概率取 0 和 π 值, t_0 和 ϕ_0 分别表示起始时刻和初相。在下面的推导中, 为方便计 (不失一般性) 可取

$t_0 = 0, \phi_0 = 0$ 令 $a_n = \cos \theta_n, a(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n q(t - nT_c)$, 则式 (8) 可写为

$$s(t) = a(t) \cos(2\pi f_0 t) \quad (9)$$

可推得 $s(t)$ 的二阶循环统计量为

$$\begin{aligned} R_s(\alpha; \tau) &= \frac{1}{2} R_a(\alpha; \tau) \cos(2\pi f_0 \tau) + \frac{1}{4} R_a(\alpha - 2f_0; \tau) \\ &\quad + \frac{1}{4} R_a(\alpha + 2f_0; \tau) \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $R_a(\alpha; \tau)$ 表示 $a(t)$ 的二阶循环统计量。因此, 只要求出 $R_a(\alpha; \tau)$ 即可得 $R_s(\alpha; \tau)$ 。由文献^[10]知, $a(t)$ 的循环谱为

$$S_a(\alpha; f) = \begin{cases} (1/T_c) Q(f + \alpha/2) Q^*(f - \alpha/2), & \alpha = k/T_c \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

其中 $Q(f)$ 为 $q(t)$ 的 Fourier 变换。因为信号的循环谱与其循环统计量为 Fourier 变换对, 故由 $S_a(\alpha; f)$ 对自变量 f 进行 Fourier 逆变换, 就可得 $R_a(\alpha; \tau)$ 的表达式

$$R_s(\alpha; t) = \mathcal{F}^{-1}(S_s(\alpha; f)) = \frac{1}{T_c} \frac{\sin(p\alpha(T_c - |t|))}{p\alpha} \Big|_{\alpha=k f_c} \quad (12)$$

将式(12)代入式(10)即得 $R_s(\alpha; t)$ 的表达式. 可见, $R_s(\alpha; t)$ 的循环频率为一族离散值, 且仅与信号的 chip 速率 f_c ($1/T_c$) 和载频 f_0 有关.

3.2 基于二阶循环统计量的直扩信号参数估计

由 3.1 节推导可见, $R_s(\alpha; t)$ 的循环频率为仅与信号的 chip 速率 f_c 和载频 f_0 有关的一族离散值. 直观地, 可直接通过搜索循环统计量 $R_s(\alpha; t)$ 的一系列峰值, 得到直扩信号的循环频率, 从而来估计信号的 chip 速率 f_c 和载频 f_0 . 然而, 这种在多维条件下搜索峰值的方法计算复杂, 效率低下. 因此, 为避免多维搜索, 可考虑通过选取合适的时间间隔 t 值, 由其所对应的 $R_s(\alpha; t)$ 的某些一维切片来得到直扩信号频率参数估计.

设采样间隔为 T_s , 且 $T_s = T_c M$, 则式(12)的离散形式为

$$\begin{aligned} R_s(\alpha; mT_s) &= \frac{1}{T_c} \frac{\sin(p\alpha(T_c - |mT_s|))}{p\alpha} \Big|_{\alpha=k f_c} \\ &= \frac{\sin(kp(1 - |m|M))}{kp} \\ &= \left(1 - |m|M\right) \text{sinc}\left(k\left(1 - |m|M\right)\right) \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)中的 sinc 函数分布于各 k ($k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) 值处的幅度不均匀. 当 $m = 0$ (即 $t = 0$) 时, $R_s(\alpha; 0) = \text{sinc}(k)$, 只有当 $k = 0$ 时有非零值, 即其幅度只分布在 $k = 0$ (即 $\alpha = 0$) 处. 将 $|R_s(\alpha; 0)|$ 式带入式(10), 所得的 $|R_s(\alpha; 0)|$ 则只在 $\{0, \pm 2f_0\}$ 处有非零值. 进一步可得, 式(5)所表示的检验统计量也只有当 $\alpha_0 = 0$ 和 $\alpha_{2f_0} = \pm 2f_0$ 时有非零值. 因此, 取时间间隔 $t = 0$ 即可得到载频的估计.

而当 m 取值不为 0 (即 $t \neq 0$) 时, $R_s(\alpha; mT_s)$ 在任意整数 k 处都有非零值, 因而 $R_s(\alpha; t)$ 和式(5)中的检验统计量在所有的循环频率 $\alpha = k \cdot f_c$ 和 $\alpha = \pm 2f_0 + k \cdot f_c$ 处是非零的. 据此可得 $\alpha_0 = 0$ 和 $\alpha_{2f_0} = \pm 2f_0$ 最近邻的循环频率分别为 $\alpha_1 = \pm 2f_c$ 和 $\alpha_k = \pm 2f_0 \pm 2f_c$, 且满足 $|\alpha_1 - \alpha_0| = |\alpha_k - \alpha_{2f_0}| = f_c$. 由此, 找到距零频 α_0 (或 2 倍载频 α_{2f_0}) 最近的循环频率 α_1 (或 α_k), 即可得 chip 速率的估计.

综上可知, 取时间间隔 $t = 0$ 则式(5)中的检验统计量只在 $\alpha = 0$ 和 $\alpha = \pm 2f_0$ 处有非零值, 由此可得载频的估计. 任取一时间间隔 $t \neq 0$ 搜索距零频 α_0 (或 2 倍载频 α_{2f_0}) 最近的循环频率 α_1 (α_k), 计算它与 α_0 (α_{2f_0}) 之间的间隔, 即可得 chip 速率的估计.

4 仿真实验与结果分析

仿真实验中, 采用的直扩 BPSK 信号如式(8), 其参数为: 采样频率 $f_s = 200 \text{ kHz}$, 载频 $f_0 = 25 \text{ kHz}$, chip 速率 $f_c = 12.5 \text{ kHz}$, 初始时间 t_0 和初相 ϕ_0 均为 0, 信号样本数 $T = 1024$. 在估计式(5)中的 \sum_R 时, 选取参数为 10 的 Kaiser

窗, 窗长 $L = 1 + T/4$. 噪声为加性平稳高斯白噪声.

4.1 实验一: 直扩信号检测

图 2 所示为 $t = 5T_s$ 时得到的二阶检验统计量与循环频率的关系图, 横轴表示循环频率, 纵轴代表检验统计量 T_R . 由图 2(a) 可见, 在无噪声情况下, 信号的循环频率 α (即谱线处的频率) 与理论分析结果完全一致. 图 2(b) 为 $\text{SNR} = 5 \text{ dB}$ 时的结果, 其中与横坐标平行的直线为检测门限, 对应于虚警概率 $P_{fa} = 10^{-2}$.

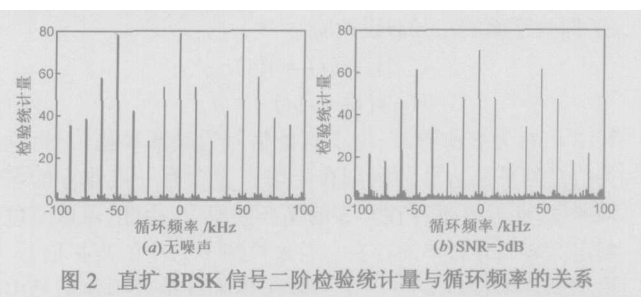


图 2 直扩 BPSK 信号二阶检验统计量与循环频率的关系

下面考察信噪比对直扩 BPSK 信号检测性能的影响.

其他条件不变, 经 100 次 Monte Carlo 仿真实验结果平均, 得到图 3 所示的检测概率 P_d 与信噪比 SNR 之间的关系曲线.

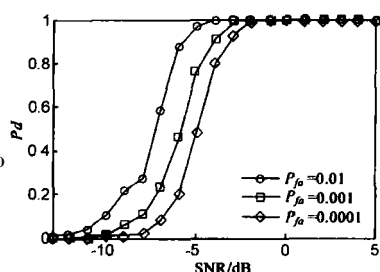


图 3 检测概率与信噪比的关系曲线

由图 3 可见, 当 $T = 1024$, 虚警概率为 10^{-4} , 信噪比为 -1 dB 时, 检测概率已经达到 1, 表明本文的方法对直扩信号的盲检测是非常有效的. 另外, 通过增加数据样本数 T 可进一步改善检测性能.

4.2 实验二: 直扩信号参数估计

仿真信号同实验一, 其循环频率为 $A = \{(\pm 50 + k \cdot 12.5) \text{ kHz} \mid k \in \mathbb{Z}\}$. 取 $P_{fa} = 10^{-4}$, $\text{SNR} = 0 \text{ dB}$, 其余参数不变. 由实验一知, 此条件下可实现直扩信

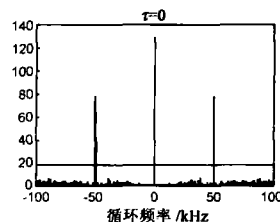


图 4 载频估计实验中检测到的循环频率

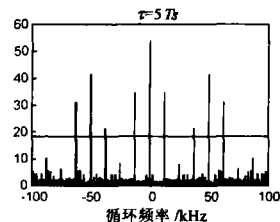


图 5 chip 速率估计实验中检测到的循环频率

号的可靠盲检测. 为估计表 1 图 4 中检测到的 T_R 及对应 α

计载频, 取 $t = 0$ 所得	$T_R: (T_R \geq \Gamma)$	128.4593	78.6503
结果如图 4 和表 1 所示	对应的 α (kHz)	0	± 50.0000

示. 由表 1 可知, 2 倍载频为 50.0000 kHz , 则载频估计值为 $f_0 = 25 \text{ kHz}$. 为估计 chip 速率取 $t = 5T_s$, 结果如图 5 和表 2 所示. 按本文的 chip 速率估计方法, 可得其估计值为 $f_c =$

12 5kHz 由此可见,直扩信号载频和 chip 速率的估计值与真实值完全一致.

表 2 图 5 中检测到的 τ_R 及对应 α

$\tau_R: (\tau_R \geq \Gamma)$	53.4299	34.7019	21.5524	41.5207	31.3545
对应的 α (kHz)	0	± 12.5000	± 37.5000	± 50.0000	± 62.5000

5 结束语

本文将渐近最优 χ^2 检验方法推广到直扩信号的盲检测,提出了基于循环统计量的直扩信号检测方案;推导了直扩信号二阶循环统计量的表达式,分析了自变量 t 对 $R_x(\alpha)$ 值的影响,得出了直扩信号的载频和 chip 速率的盲估计方法.该方法可实现较低信噪比下直扩信号的可靠检测;在此基础上,还可实现对直扩信号的载频、chip 速率非常好的盲估计.此外,这种方法在直扩信号的参数估计中避免了多维搜索,提高了计算效率,为非协作情况下的扩频通信信号检测和问题提供了一条有效的解决途径.

参考文献:

- [1] Simon M, Omura J, Scholtz R, Levitt B. Spread Spectrum Communications[M]. New York: McGraw Hill Inc, 1994.
- [2] Gardner W A. Signal Interception a unifying theoretical framework for feature detection[J]. IEEE Trans Commun, 1988, 36(8): 897-906.
- [3] Gardner W A. Exploitation of spectral redundancy in cyclostationary signals[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1991, (8): 14-36.
- [4] Gardner W A, Spooner C M. Signal interception performance advances of cyclic-feature detectors[J]. IEEE Trans Commun, 1992, 40(1): 149-159.
- [5] 黄春琳,姜文利,等.对低截获概率相位编码信号检测的有限多循环检测器[J].电子学报,2002,30(6): 916-918.
Huang Chun-lin, Jiang Wen-li et al. Finite multicycle detector of LPI phase-coded signals[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(6): 916-918 (in Chinese).
- [6] 黄春琳,柳征,等.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.

Huang Chun-lin, Liu Zheng, et al. Chipwidth carrier frequency and amplitude estimation of DSSS signal based on cyclic spectrum amplitude[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(9): 1353-1356 (in Chinese).

- [7] 詹亚锋,曹志刚,等.直接扩频序列信号的参数估计[J].系统工程与电子技术,2004,26(9): 1176-1179.
Zhan Ya-feng, Cao Zhi-gang, et al. Parameter estimation for direct spread spectrum sequence signals[J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(9): 1176-1179 (in Chinese).
- [8] Dandwate A V. Testing for presence of kth-order cyclostationarity[A]. IEEE Signal Processing Workshop on Higher-Order Statistics[C]. USA: IEEE Press, 1993, 240-244.
- [9] Dandwate A V, Ginnakis G B. Statistical tests for presence of cyclostationarity[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1994, 42(9): 2355-2369.
- [10] Gardner W A. Spectral correlation of modulated signals part I: analog modulation[J]. IEEE Trans Commun, 1987, 35(6): 584-594.

作者简介:



金 艳 女,1978 年生于山东泰安.西安电子科技大学讲师、博士生.主要从事统计信号处理、信号检测与参数识别等方面的研究.
E-mail: yjln@mail.xidian.edu.cn



姬红兵 男,1963 年生于陕西榆林.工学博士、西安电子科技大学教授、博士生导师、IEEE 会员、中国电子学会高级会员.主要从事信号与信息处理和模式识别等领域的研究.