

doi: 10.7690/bgzdh.2013.03.016

## 基于谱相关的直接序列扩频信号参数估计

刘孟孟, 张立民, 钟兆根

(海军航空工程学院电子信息工程系, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 直接序列扩频信号 (direct sequence spread spectrum, DSSS) 是抗干扰低截获概率信号, 实现其参数的估计具有重要意义。针对直扩信号载频、码元速率、相位的估计问题, 结合谱相关的基本理论, 提出了对直扩信号载频、码元速率、相位估计的谱相关方法。理论分析和仿真结果表明: 在没有伪随机码序列及相关参数先验信息的条件下, 该方法能够完成低信噪比时对信号的检测和载频、码速率、初相的估计, 可有效提高计算效率。

**关键词:** 直接序列扩频信号; 谱相关; 检测; 参数估计

**中图分类号:** TJ02 **文献标志码:** A

## DSSS Signal Parameter Estimation Based on Cyclic Spectrum

Liu Mengmeng, Zhang Limin, Zhong Zhaogen

(Department of Electronic Information Engineering, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** It is important to estimate the parameter of direct sequence spread spectrum (DSSS) signal, which is jam-proof and low probability of intercept. Aiming at the problem of parameter estimation for DSSS carrier frequency, chip width and phases, the basic cyclic spectrum theories are synthesized, and a new method which can estimate the parameters of carrier frequency, chip-ratio and phases is proposed. The theory analysis and simulation results show that, without pseudo-random code sequence and corresponding parameter transcendental information, the method can realize signal detection and carrier frequency, chip-rate, initial phase under low SR, and effectively improve calculation efficiency.

**Key words:** DSSS signal; cyclic spectrum; detection; parameter estimation

### 0 引言

直接序列扩频信号抗干扰、抗截获、抗检测能力强, 具有多址能力和较好的抗衰落以及抗多径能力, 被广泛应用到当代通信生活中。而在通信对抗中, 难以有效地检测和还原截获信号, 已成为现在通信对抗研究的主要问题之一。实现直扩信号的盲解扩, 首先需要实现对信号的检测和信号参数的有效估计, 针对这一问题, 学者们提出了平方倍频法、时域自相关法、小波变换法和高阶累积量法<sup>[1-2]</sup>等多种方法, 但这些方法或是要求有一定先验信息, 或是在低信噪比条件下效果下降明显, 或是只针对一种参数。笔者将循环平稳理论应用于低信噪比条件下直扩信号的盲参数估计, 获得了较好的仿真结果。

### 1 直扩信号的谱相关函数

为简化计算, 笔者以 BPSK 信号为例。由文献[3]可知, QPSK、8PSK、16PSK 等相位调制信号也具有类似的谱相关特性, 可用本方法实现参数估计。

假设接收到的信号为:

$$x(t) = s(t) + n(t) = d(t)p(t)\cos(2\pi f_0 t + \varphi) + n(t) \quad (1)$$

其中:  $n(t)$  为均值为零, 方差为  $\sigma^2$  的高斯白噪声信

号, 与  $s(t)$  不相关;  $d(t) \in \{+1, -1\}$  为信息码序列, 码片宽度为  $T_d$ ;  $p(t) \in \{+1, -1\}$  为扩频码序列, 码片宽度为  $T_p$ ;  $f_0$  为载波频率;  $\varphi$  为初相。

直扩信号是具有随机信号特征的周期平稳信号, 属于循环平稳信号, 其循环自相关函数为:

$$R_x^\alpha(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} R(t+\tau/2, t-\tau/2) e^{-j2\pi\alpha t} dt = \langle x(t+\tau/2)x^*(t-\tau/2)e^{-j2\pi\alpha t} \rangle \quad (2)$$

其中:  $\langle \cdot \rangle$  表示时间平均;  $\alpha$  为信号  $x(t)$  的循环频率, 只有当  $\alpha \neq 0$  时, 才能得到信号的循环平稳特性, 对式 (2) 作傅里叶变换可得信号的谱相关密度:

$$S_x^\alpha(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x^\alpha(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (3)$$

信号  $x(t)$  在  $[t-T/2, t+T/2]$  内的频谱为

$$X_T(t, f) = \int_{-T/2}^{T/2} x(u) e^{-j2\pi f u} du \quad (4)$$

将其频谱分别向上向下搬移  $\alpha/2$ , 可得到两式的时间平均互相关为

$$S_{X_T}^\alpha(f) \triangleq \frac{1}{\Delta t} \int_{-\Delta t/2}^{\Delta t/2} X_T(s, f + \alpha/2) X_T^*(s, f - \alpha/2) ds \quad (5)$$

令  $\Delta t, T \rightarrow \infty$ , 可得

收稿日期: 2012-09-25; 修回日期: 2012-10-13

基金项目: 国家自然科学基金(61032001, 60972159, 61002006)

作者简介: 刘孟孟(1987—), 男, 河北人, 硕士研究生, 从事盲信号处理研究。

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} S_{x_T}^\alpha(f) = S_x^\alpha(f) \quad (6)$$

由式 (6) 可知, 当信号足够长时, 信号搬移特定频率后得到的 2 个信号的时间平均互相关与谱相

$$R_x^\alpha(\tau) = \langle x(t+\tau/2)x^*(t-\tau/2)e^{-j2\pi\alpha t} \rangle = \frac{1}{4} \left\langle \left[ d(t+\tau/2)p(t+\tau/2) \left( e^{j[2\pi f_0(t+\tau/2)+\varphi]} + e^{-j[2\pi f_0(t+\tau/2)+\varphi]} \right) + 2n(t+\tau/2) \right] \cdot \left[ d(t-\tau/2)p(t-\tau/2) \left( e^{j[2\pi f_0(t-\tau/2)+\varphi]} + e^{-j[2\pi f_0(t-\tau/2)+\varphi]} \right) + 2n(t-\tau/2) \right] e^{-j2\pi\alpha t} \right\rangle \quad (7)$$

根据原信号与噪声不相关, 互相关值为零, 且将  $d(t)p(t)$  视为  $g(t)$ , 可将上式简化为

$$R_x^\alpha(\tau) = R_s^\alpha(\tau) + R_n^\alpha(\tau) \quad (8)$$

其中,

$$R_s^\alpha(\tau) = \frac{1}{4} \langle g(t+\tau/2)g(t-\tau/2) \left( e^{j(4\pi f_0 t + 2\varphi)} + e^{j2\pi f_0 \tau} + e^{-j(4\pi f_0 t + 2\varphi)} + e^{-j2\pi f_0 \tau} \right) e^{-j2\pi\alpha t} \rangle \quad (9)$$

$$R_n^\alpha(\tau) = \langle n(t+\tau/2)n(t-\tau/2)e^{-j2\pi\alpha t} \rangle$$

$$S_s^\alpha(f) = \begin{cases} \frac{1}{4T_c} [Q(f+f_0+\alpha/2)Q^*(f+f_0-\alpha/2) + Q(f-f_0+\alpha/2)Q^*(f-f_0-\alpha/2)] e^{-j2\pi\alpha t}, & \alpha = k/T_c \\ \frac{1}{4T_c} Q(f+f_0+\alpha/2)Q^*(f-f_0-\alpha/2) e^{[-j[2\pi(\alpha+2f_0)t_0+2\varphi_0]]}, & \alpha = -2f_0+k/T_c \\ \frac{1}{4T_c} Q(f-f_0+\alpha/2)Q^*(f+f_0-\alpha/2) e^{[-j[2\pi(\alpha-2f_0)t_0-2\varphi_0]]}, & \alpha = 2f_0+k/T_c \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $Q(f)$  为码元窗函数  $q(t)$  的傅里叶变换, 可见,  $S_s^\alpha(f)$  只有在  $\alpha=k/T_c$  和  $\alpha=\pm 2f_0+k/T_c$  处才存在<sup>[5]</sup>, 可以利用这一特性实现直扩信号的参数估计。

## 2 直扩信号的参数估计

### 2.1 载波与码元速率的估计

在式 (11) 中, 当频率  $f=0$  时, 功率谱密度的幅度<sup>[6-7]</sup>为:

$$|S_x^\alpha(f=0)| = \begin{cases} \frac{1}{2T_c} |Q(f_0+\alpha/2)Q^*(f_0-\alpha/2)| & \alpha = k/T \\ \frac{1}{4T_c} |Q(\pm f_0+\alpha/2)|^2 & \alpha = \mp 2f_0+k/T_c \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

由式 (12) 可知, 当  $\alpha \neq 0$  时,  $S_x^\alpha(0)$  幅度最大值出现在循环频率  $\alpha=2f_0$  处, 通过搜索可得到载波准确值, 据此也可实现信号的检测, 同时, 幅度最大值与相邻次大值所对应的循环频率之差即为信号的码元速率。另外, 当将  $f=f_0$  代入式 (11), 可得  $f=f_0$  时功率谱密度的幅度:

关密度即循环谱是等价的; 因此, 循环谱又称为谱相关函数。

针对文中所假设信号, 将式 (1) 代入式 (2) 可得:

则信号  $x(t)$  的谱相关函数为

$$S_x^\alpha(f) = S_s^\alpha(f) + S_n^\alpha(f) \quad (10)$$

其中,  $S_s^\alpha(f)$  和  $S_n^\alpha(f)$  分别为  $R_s^\alpha(\tau)$  与  $R_n^\alpha(\tau)$  的傅里叶变换。  $S_n^\alpha(f)$  为噪声的谱相关函数, 但高斯白噪声为平稳随机信号, 不具有循环平稳特性, 这里只考虑  $S_s^\alpha(f)$ 。

由文献[4]知, 直扩信号的谱相关函数  $S_s^\alpha(f)$  为

$$|S_x^\alpha(f=f_0)| = \begin{cases} \frac{1}{4T_c} |Q(2f_0+\alpha/2)Q^*(2f_0-\alpha/2)| + |Q(\alpha/2)|^2, & \alpha = k/T \\ \frac{1}{4T_c} |Q(2f_0+\alpha/2)Q^*(\alpha/2)|, & \alpha = \pm 2f_0+k/T \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

可见, 当  $f=f_0$  时峰值出现在  $\pm 1/T_c$  处, 根据峰值也可估计出码元速率。为提高计算精度, 笔者对  $(\alpha=2f_0 \pm 1/T_c, f=0)$  和  $(\alpha=1/T_c, f=f_0)$  3 处的估计值进行平均, 来估计码元速率。

### 2.2 初相的估计

式 (11) 还包含有相位信息, 将  $\alpha=2f_0$  代入可得:

$$S_x^{2f_0}(f) = \frac{1}{4T_c} Q(f)Q^*(f)e^{-j2\varphi_0} \quad (14)$$

此时  $S_x^{2f_0}(f)$  的相位恒为  $2\varphi_0$ , 即若不考虑噪声, 在  $\alpha=2f_0$  处, 只有当相位为初相的 2 倍时, 直扩信号的谱相关函数幅值才不为零, 然而在实际情况下, 噪声存在时, 可选取一适当的门限来与幅值进行比较, 从而估计出初相。由文献[8]可将门限值设置为:

$$\gamma = \sqrt{2\sigma_s^2 \ln\left(\frac{1}{P_f}\right)} \quad (15)$$

其中:  $\sigma_s^2$  为  $s_s^\alpha(f)$  实部和虚部的方差;  $P_f$  为虚警概率。

### 3 仿真实验及分析

笔者通过蒙特卡罗数字仿真实验对式 (1) 所列信号采用谱相关方法估计其载频、码元速率和初相, 实验重复次数为 500 次, 采用 127 码长  $m$  序列扩频码, 采样频率  $f_s = 200$ , 载波频率  $f_0 = 50$ , 码元速率  $f_c = 20$ , 初相  $\varphi = 0$ , 信噪比为  $-15 \sim 20$  dB, 噪声方差  $\sigma = 0.1$ , 虚警概率  $P_f = 0.1$ , 且由于谱相关函数关于  $\alpha = 0$  对称, 这里只考虑  $\alpha > 0$  部分。

图 1~3 分别为在不同信噪比条件下对载频, 码元速率以及初相估计均方的误差情况。由文献[9]可知, 估计 3 种参数的估计精度与采集时间密切相关, 故对每种参数的估计分别采用  $T=64T_c$  与  $T=32T_c$  种采样时间, 可见随着信噪比的减小, 估计误差逐渐增大, 但增加采集时间可以较大提高估计精度; 因此, 在现有条件下增加采集时间或增加数据长度可以得到更好的估计效果, 值得深入研究。

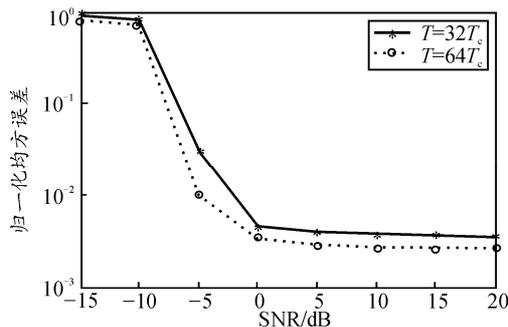


图 1 载频估计方差

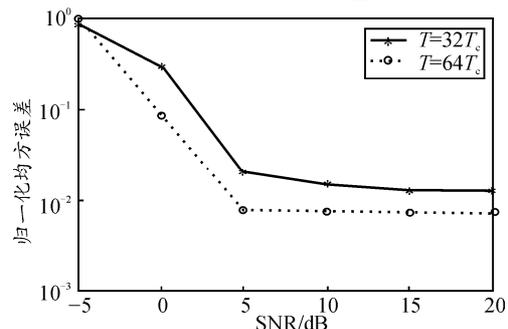


图 2 码元速率估计方差

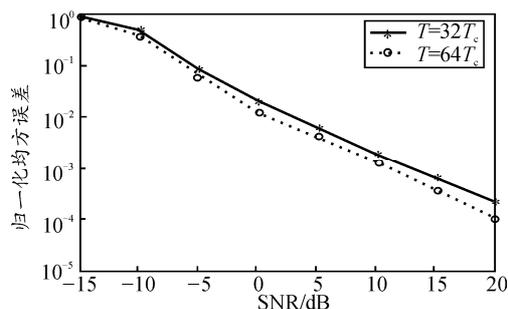


图 3 初相估计方差

图 4 为谱相关估计方法与小波变换方法对载频进行估计时的均方误差情况, 在相同的信噪比条件下, 对载波的估计谱相关方法明显优于小波变换法。

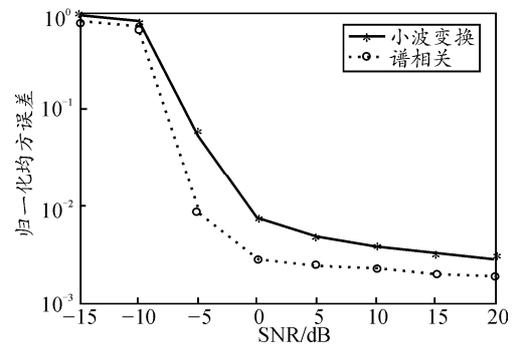


图 4 不同方法载频估计方差

### 4 结语

谱相关理论将功率谱定义从频率轴二维平面推广到频率-循环频率三维空间, 包含了信号的频率及相位信息, 不仅能实现信号的检测, 还能估计出载频、码速率等参数, 有很大的适用范围。笔者分析了谱相关理论的相关知识, 将其应用于直扩信号的检测及参数估计之中, 并进行了仿真实验, 实验结果表明: 在没有伪随机码序列及相关参数先验信息的条件下, 该方法能够完成低信噪比时对信号的检测和载频、码速率、初相的估计, 并且由于该估计算法是在非零循环频率上对循环谱进行多次一维搜索, 有效地提高了计算效率。

### 参考文献:

- [1] 马丽华, 杨慧中. 一种低信噪比下 DSSS 的载频估计方法[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(5): 83-85.
- [2] 孙梅, 韩力. 基于小波变换的移相键控信号符号速率估计[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(3): 378-380.
- [3] 张炜, 杨虎, 张尔扬. 多进制移相键控信号的谱相关特性分析[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(2): 392-396.
- [4] 赵仕良. MSPK 信号的循环平稳特性分析[J]. 四川师范大学学报: 自然科学版, 2006, 29(1): 78-81.
- [5] 刘伟, 杜娟. 基于循环谱理论的弱信号检测和特征参数估计[J]. 通信技术, 2010, 43(4): 28-31.
- [6] 马丽华, 杨慧中. 一种 DSSS 信号载频与码片速率的估计方法[J]. 计算机仿真, 2010, 27(10): 343-346.
- [7] 詹亚锋, 曹志刚, 马正新. 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.
- [8] 赵知劲, 张伟卫, 徐世宇. 循环相关谱检测方法及其门限的确定[C]. 电子工业出版社: 2009 年通信理论与信号处理学术年会论文集, 2009: 54-60.
- [9] 黄春琳, 柳征, 姜文利, 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.