

# 循环功率谱特征检测算法在认知超宽带无线通信的应用

许晓丹 毕光国 张在琛

(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

**摘要:** 认知超宽带无线通信技术结合了超宽带无线通信技术和认知无线电技术, 信号频谱检测是认知超宽带无线通信系统的核心模块之一。循环平稳特性普遍存在于各种调制信号中, 该文研究了一种新的检测算法——循环功率谱特征检测算法, 并以 OFDM 信号为例给出了软件仿真和性能分析。该检测算法能够区分有用信号, 噪声信号和干扰信号, 是最适合认知超宽带无线通信系统的。

**关键词:** 无线通信; 认知超宽带; 循环功率谱特征检测; 循环功率谱估计

**中图分类号:** TN92

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2008)10-2435-04

## Application of Cyclic Spectrum Feature Detection to Cognitive UWB Wireless Communication

Xu Xiao-dan Bi Guang-guo Zhang Zai-chen

(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Cognitive UWB technology combines UWB technology and Cognitive Radio (CR) technology. Spectrum detection is one of key modules for Cognitive UWB wireless communication system. Cyclostationary characteristic is ubiquitous in almost all the modulated signals. This paper investigates a new detection method that is Cyclic Spectrum Feature Detection (CSFD). Setting OFDM signal as example, it gives out the software simulation and performance analysis. This Detection method can distinguishes desired signal, noise and interference signal, so it is optical for Cognitive UWB wireless communication system.

**Key words:** Wireless communication; CUWB; CSFD; Cyclic spectrum estimation

### 1 引言

超宽带(Ultra Wideband, UWB)<sup>[1]</sup>无线通信技术具有高通信容量、抗多径衰落等优点, 然而其带宽很宽, 不可避免地会影响窄带无线通信系统。认知无线电(Cognitive Radio, CR)<sup>[2-4]</sup>技术是通过智能频谱管理来解决频谱资源短缺的有效方法。UWB 无线通信技术是 CR 技术重要的应用环境。因而, 一种新的无线通信技术——认知超宽带(Cognitive UWB, CUWB)技术应运而生了, 它将成为未来无线通信的发展方向之一。

频谱检测技术是 CUWB 无线通信系统物理层的关键技术之一。传统的频谱检测算法有匹配滤波器法和能量检测算法。匹配滤波器法虽然是一种信噪比(SNR)意义上最优<sup>[5]</sup>的检测算法, 但是针对每种第 1 用户(Primary User, PU)信号, 必须具备唯一的匹配滤波器, 需要庞大的硬件支持。能量检测算法虽然结构简单, 实用性好, 但是该算法既不能区分有用信号、噪声信号和干扰信号, 也无法检测低 SNR 环境的信号。因此, 这两种算法都不适合 CUWB 无线通信系统。

为了克服上述两种算法的缺点, 本文研究了用于 CUWB 无线通信系统的循环功率谱特征检测(Cyclic Spectrum

Feature Detection, CSFD)算法及其实现。

### 2 系统模型

循环平稳信号是特殊的非平稳随机过程。对时间连续的循环平稳信号  $x(t)$ , 其数学期望和自相关函数随观察时刻做周期  $T$  的变化<sup>[6]</sup>,  $T$  称为  $x(t)$  的循环周期(cyclic period):

$$\begin{aligned} E\{x(t+lT)\} &= E\{x(t)\} = C(t), & l \in Z \\ R_x(t+lT, \tau) &= R_x(t, \tau) = E\left\{x\left(t+\frac{\tau}{2}\right)x^*\left(t-\frac{\tau}{2}\right)\right\}, & l \in Z \end{aligned} \quad (1)$$

因此, 循环平稳信号的数学期望和自相关函数都是关于时间  $t$  以及时延  $\tau$  的二维函数, 并且是  $t$  的周期函数。因而, 其自相关函数  $R_x(t, \tau)$  能够在  $t$  域进行傅里叶级数展开:

$$R_x\left(t+\frac{\tau}{2}, t-\frac{\tau}{2}\right) = \sum_{\alpha} R_x^{\alpha}(\tau) e^{j2\pi\alpha t} \quad (2)$$

其中  $\{R_x^{\alpha}\}$  是傅里叶级数的展开系数, 且

$$R_x^{\alpha}(\tau) \triangleq \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} R_x\left(t+\frac{\tau}{2}, t-\frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi\alpha t} dt \quad (3)$$

则  $R_x^{\alpha}(\tau)$  称为循环平稳信号的循环自相关函数,  $\alpha \in (-\infty, +\infty)$  称为循环频率。对  $R_x^{\alpha}(\tau)$  的时延  $\tau$  做傅里叶变换得到  $x(t)$  的循环功率谱, 也称为循环功率谱密度:

$$S_x^{\alpha}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_x^{\alpha}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (4)$$

当  $\alpha = 0$  时, 循环自相关退化为一般的自相关函数, 循环功

率谱密度退化为一般的功率谱密度，与传统的随机过程理论相一致。

假设循环周期为  $T$  的循环平稳随机过程  $x(t)$  的两个频移分量 ( $\alpha \neq 0$ ):  $u(t) = x(t)e^{-j\pi\alpha t}$ ,  $v(t) = x(t)e^{j\pi\alpha t}$ , 则其互相关函数:

$$R_{uv}[\tau] = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} E[u(t)v^*(t-\tau)]dt$$

$$= \begin{cases} e^{j\pi\alpha\tau} R_x(\tau)\delta(\tau), & x(t) \text{ 是平稳随机过程信号} \\ e^{j\pi\alpha\tau} R_x^\alpha(\tau), & x(t) \text{ 是循环平稳随机过程信号} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)说明, 当  $x(t)$  是平稳序列时,  $x(t)$  的两个间隔为  $2\pi\alpha$  ( $\alpha \neq 0$ ) 的频移分量是互不相关的; 当  $x(t)$  是循环平稳序列时,  $x(t)$  的两个间隔为  $2\pi\alpha$  ( $\alpha \neq 0$ ) 的频移分量是相关的。因此, 循环自相关函数  $R_x^\alpha(\tau)$  反映了循环平稳信号两个频移分量的相关程度。

以带循环前缀的 OFDM 信号为例, 研究其循环平稳特性和循环功率谱。OFDM 信号为<sup>[7]</sup>

$$x(t) = \sum_{k=0}^{N-1} x_k(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=-\infty}^{+\infty} d_l(k)q(t-lT)e^{j\frac{2\pi kt}{T_u}} \quad (6)$$

其中  $N$  是子载波数;  $T$  是包含循环前缀的 OFDM 符号的时间;  $T_u$  是不包含循环前缀的  $N$  个子载波的时间;  $d_l(k)$  表示第  $l$  个 OFDM 符号中第  $k$  个子载波的数据符号, 假设各子载波是独立同分布的, 其方差为  $\sigma_d^2$ ;  $q(t)$  是脉冲成形函数。令  $v_{k,l}(t) = \sum_{l'=-\infty}^{+\infty} d_{l'}(k)q(t-l'T)$ , 则  $R_{v_{k,l}v_{k,l'}}(t, \tau) = E\{v_{k,l}(t)v_{k,l'}^*(t-\tau)\} = \sigma_d^2 q(t-lT)q^*(t-\tau-l'T)\delta_{k,k'}\delta_{l,l'}$ 。

OFDM 信号的自相关函数为

$$R_x(t, \tau) = E\left\{\sum_{k=0}^{N-1} x_k(t) \sum_{k'=0}^{N-1} x_{k'}^*(t-\tau)\right\} = \sum_{k=0}^{N-1} R_q(t, \tau) e^{j\frac{2\pi k\tau}{T_u}} \quad (7)$$

其中  $R_q(t, \tau) = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \sigma_d^2 q(t-lT)q^*(t-\tau-lT)$ 。所以, 其自相关函数是周期  $T$  的周期函数, 满足循环平稳信号的定义。应用循环平稳理论对 OFDM 信号分析, 其循环自相关函数为

$$R_x^\alpha(\tau) = R_q^\alpha(\tau) \sum_{k=0}^{N-1} e^{j\frac{2\pi k\tau}{T_u}} \quad (8)$$

其中  $R_q^\alpha(\tau)$  是  $R_q(t, \tau)$  的傅里叶级数展开系数。则 OFDM 信号的循环功率谱为

$$S_x^\alpha(f) = \begin{cases} \frac{\sigma_d^2}{T} \sum_{k=0}^{N-1} Q\left(f - \frac{k}{T_u} + \frac{\alpha}{2}\right) Q^*\left(f - \frac{k}{T_u} - \frac{\alpha}{2}\right), & \alpha = \frac{p}{T} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

其中  $p$  为任意一个整数,  $Q(f)$  是  $q(t)$  的傅里叶变换。

由式(9)可见, OFDM 信号只在循环频率  $\alpha = p/T$  处具有非零的循环功率谱密度, 而在其他循环频率处均为 0。假设 OFDM 信号含有 64 个子载波, 采取 8 倍过采样, 且循环前缀为 1/4, 则该 OFDM 信号的循环功率谱密度  $|S(f, \alpha)|$  关于频率  $f$  和循环频率  $\alpha$  如图 1 所示。

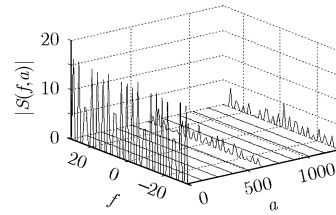


图 1 OFDM 信号的循环功率谱图

### 3 CSFD 算法系统模型

由于信号的调制方式、载波频率等不同, 存在不同的循环功率谱。因此, CSFD 算法根据不同信号在各循环频率呈现的不同特征达到信号检测的目的。其系统模型如图 2 所示。

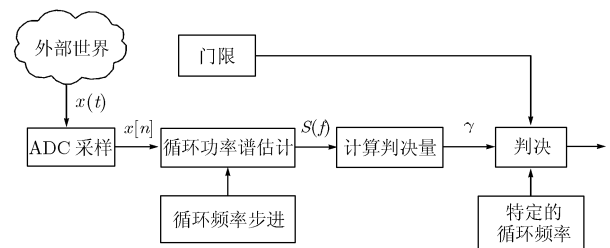


图 2 CSFD 算法的系统模型

外部世界存在各种各样的 PU 信号, 如蜂窝通信信号、WiMax 信号等。在信号检测时, 首先将时间连续信号  $x(t)$  经过高速 ADC 变换器转换成离散时间序列  $x[n]$ ; 然后采用循环功率谱估计算法, 以特定的循环频率步长计算输入序列的循环功率谱; 最后, 将特定循环频率和频率处的循环功率谱与预先设定的门限比较, 做出判决, 完成了循环功率谱特征检测。

CSFD 算法的核心模块是循环功率谱估计, 本文采用周期图循环功率谱估计算法。假设输入的离散时间序列为  $x[n]$ ,  $n = 0, 1, \dots, N-1$ , 采样时间为  $T_s$ , 即以  $\Delta t = NT_s$  时间内的信号来估计循环功率谱, 其估计算法<sup>[8]</sup>为

$$\left. \begin{aligned} X_T[k] &= \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} \\ T_{X_T}^\alpha[k] &= \frac{1}{N} X_T\left[k + \frac{\alpha}{2}\right] X_T^*\left[k - \frac{\alpha}{2}\right] \\ S_{X_T}^\alpha[k]_{\Delta f} &= \sum_{m=0}^{M-1} T_{X_T}^\alpha[kM + m] \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

首先对输入的时间序列做  $N$  点的 FFT, 得到  $X_T[k]$ ; 然后对 FFT 结果使用周期图谱估计完成谱相关, 得到  $T_{X_T}^\alpha[k]$ ; 最后对谱相关结果进行平滑, 最终得到输入信号的循环功率谱估计  $S_{X_T}^\alpha[k]_{\Delta f}$ 。

该算法的循环频率分辨率和频率分辨率分别为  $\Delta\alpha = 1/(NT_s)$ ,  $\Delta f = M/(NT_s)$ 。为了获得可靠的谱估计结果, 需要满足  $\Delta t \cdot \Delta f \gg 1$ <sup>[9]</sup>, 即  $NT_s \cdot M/(NT_s) = M \gg 1$ , 所以在软件仿真时, 取  $M = 50$ 。假设输入点数为  $N$ , 该循环谱

估计算法的平均时间复杂度(以复乘个数来估算)为  $O(N/2 + (N/2)\log_2 N)$ 。

CSFD 算法的另一模块是求检测判决量。假设信号  $x[n]$  在循环频率  $\alpha_0$  和频率  $f_0$  处含有非零的循环功率谱  $S_x^{\alpha_0}(f_0)$ ，由于实际应用中，通常利用 FFT 来完成，则判决量修正为

$$\gamma = \frac{S_x^{\alpha_0}[K_0]}{\sum_{n=0}^{N-1} S_x^{\alpha_0}[n]} \quad (11)$$

其中假设共有  $N$  个循环功率谱值，其峰值在  $K_0\Delta f$  处。因此，利用该判决量最为衡量标准，设定阈值  $\gamma_{th}$ ，当  $\gamma \geq \gamma_{th}$  时，判断存在该信号，反之判断该信号不存在。

与匹配滤波器法和能量检测算法相比，CSFD 算法具有无可比拟的优势，主要体现在以下几点：第一，循环功率谱特征检测算法具有可辨识性。即使在传统的功率谱域信号具备相同的特征，在循环频率域其特性也是迥然不同的。第二，循环功率谱特征检测算法能够有效检测出低 SNR 的信号。第三，循环功率谱特征检测算法为信号检测提供更广阔的领域。它除了通过传统的循环功率谱幅度来区分信号，还可通过循环功率谱的幅度和相位信息来获得正弦载波频率、脉冲串的频率和相位等其他信息，提供了更多的特征来供信号提取。

#### 4 CSFD 算法的软件仿真和性能分析

为了获得 CSFD 算法的性能，采用 Matlab 的 Simulink 平台进行仿真，程序采用 Simulink/C 语言编写。其仿真模型如图 3 所示。

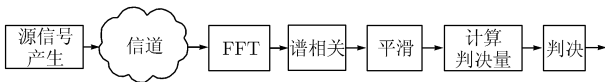


图 3 仿真模型系统框图

以 OFDM 信号为例来仿真 CSFD 算法。假设 OFDM 信号，采用 64 个子载波，8 倍过采样，循环前缀为 1/4，则图 4(a)分别仿真了在 AWGN 信道和 UWB 的 CM1 信道的性能，给出了检测概率 PR 关于 SNR 的曲线。其中“\*”表示能量检测算法在 AWGN 信道上的检测曲线，“▷”表示 CSFD 算法在 AWGN 信道上的检测曲线，“□”表示了 CSFD 算法在多径信道的检测曲线。则如果以检测概率 80% 作为检测标准，那么在 AWGN 信道和 UWB 的 CM1 信道中，CSFD 算法都可以工作在 SNR 为 -13dB 的环境。如果与能量检测算法在 AWGN 信道上的性能比较，可以看到若以 80% 作为性能标准，能量检测算法只能工作在 SNR 为 5dB 的环境中。因此，在低 SNR 的环境中，CSFD 检测算法的优势非常明显。图 4(b)比较了 OFDM 信号在 CSFD 算法和二阶循环统计检测算法的在 AWGN 信道上检测概率曲线，其中“\*”表示二阶循环统计检测算法在 AWGN 信道上的检测曲

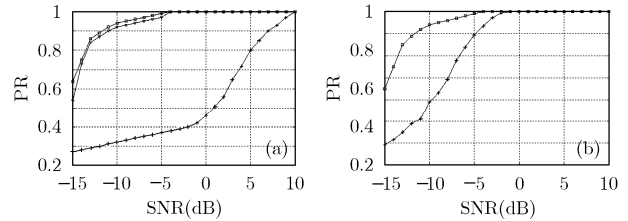


图 4 OFDM 信号的检测曲线

线，“□”表示 CSFD 算法在 AWGN 信道上的检测曲线，从而可以看出 CSFD 具有更好的检测性能。

循环功率谱揭示了信号在循环频率域的信号固有特征，反映了信号频谱分量的相关性。由于高斯噪声各频谱分量互不相关，从理论上说，该信号在非零循环频率处的循环功率谱密度为 0，而调制信号的频谱分量均具有相关性。因此，在非零循环频率处分析信号特征时，可以忽略噪声的影响。但是实际上噪声不可能是完全随机的，并且采用了一些近似方法估计循环功率谱，所以高斯噪声在非零循环频率处不完全为 0。然而与功率谱域相比，其值小很多(如图 5)。因此，循环功率谱特征检测算法能够在很强噪声背景中检测信号。

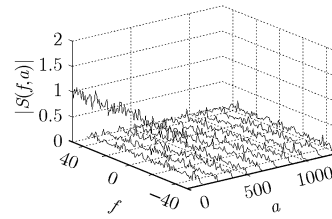


图 5 高斯噪声的循环功率谱

#### 5 结束语

本文主要研究了循环平稳特性在 CUWB 无线通信系统的应用。CUWB 无线通信系统的频谱检测旨在检测 PU 信号的存在性，循环功率谱特征检测算法是最适合 CUWB 无线通信系统的。该检测算法能够检测低 SNR 的信号，以 OFDM 信号为例它能够工作在 SNR 为 -13dB，而且它能够针对各种信号独特的循环功率谱特征，在不同的循环频率域同时检测出各种 PU 信号。

#### 参考文献

- [1] 张在琛, 毕光国. 超宽带无线通信技术及其应用. 移动通信, 2004(1-2): 110-114.
- [2] Joseph Mitola III. Cognitive radio for flexible mobile multimedia communication. IEEE International Workshop, Mobile Multimedia Communication, 1999 (MoMuC'99). San Diego, CA, USA, 15-17 Nov. 1999: 3-10.
- [3] Haykin S. Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 2005, 23(2): 201-220.

- [4] Cabrić D and Brodersen R W. Physical layer design issues unique to cognitive radio system. PIMRC 2005 IEEE 16th International Symposium, Indoor and Mobile Radio Communications, 2005. Berlin Germany, 11-14 Sept. 2005: 759-763.
- [5] Proakis G John 著. 张力军, 张宗橙, 郑宝玉等译. 数字通信. 第4版. 北京: 电子工业出版社, 2003: 173-176.
- [6] Gardner W A. Introduction to Random Processes with Applications to Signals and Systems. NewYork: Macmilan, 1985: 301-305.
- [7] 尹长川, 罗涛, 乐光新. 多载波宽带无线通信技术. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004: 23-25.
- [8] Gardner W A. Signal interception: A unifying theoretical framework for feature detection. *IEEE Trans. on Communications*, 1988, 36(8): 897-906.
- [9] Yeung G K and Gardner W A. Search efficient methods of detection of cyclostationary signals. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1996, 44(5): 1214-1223.
- 许晓丹: 女, 1981年生, 硕士, 研究方向为超宽带无线通信技术.
- 毕光国: 男, 1939年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为宽带通信和无线通信新技术.
- 张在琛: 男, 1975年生, 博士, 研究员, 硕士生导师, IEEE 会员, 主要研究方向为超宽带无线通信技术及第四代移动通信系统.