

调制指数为整数和半整数的连续相位调制信号的盲检测

张仔兵 李立萍 肖先赐
(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

摘要 根据调制指数为整数和半整数的连续相位调制(CPM)信号的循环平稳特性, 该文提出一种在未知编码序列、载频、码元宽度及峰值频率偏移等参数的情况下对 CPM 信号的盲检测方法。该方法是对传统循环谱分析器的改进。仿真实验证明该方法具有良好的检测性能并容易实现, 具有广阔的工程应用前景。

关键词 连续相位调制, 循环平稳, 检测

中图分类号: TN911.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)10-1770-04

Blind Detection of Continuous Phase Modulation Signals with Integer and Half Integer Modulation Index

Zhang Zi-bing Li Li-ping Xiao Xian-ci

(College of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract Based on the characteristics of cyclostationarity of Continuous Phase Modulation (CPM) signals with integer and half integer modulation index, a novel method of detecting CPM signals under the condition of unknown code sequence, carrier frequency, chip width and peak frequency deviation is presented in this paper. This method is an improvement of the traditional cyclic spectral analyzer; as well, its high detection performance is proved by the computer simulations.

Key words Continuous phase modulation, Cyclostationarity, Blind detection

1 引言

近年来, 连续相位调制(CPM)信号以其恒包络和良好的频谱特性(窄主瓣、快速滚降的旁瓣)在现代通信系统中越来越受到人们的关注^[1-4]。调制指数为整数或半整数的CPM信号是这种调制类型中的一大子类。在准确知道接收信号及其所有参数的情况下, CPM信号的最佳接收机是由相关器跟随一个最大似然序列检测器组成, 该检测器通过维特比算法进行状态网络搜索最小欧氏距离的路径。然而在非合作通信的情况下, 我们无法预先获知信号的码元序列及调制参数, 对信号存在与否的判决将成为后处理的首要任务。在没有任何信号的先验知识, 且背景噪声是加性平稳高斯白噪声的情况下, 能量检测方法^[5-6]是一种简单而有效的检测方法, 其基本思想是信号加噪声的能量大于噪声的能量, 但其严重的弱点是对时变噪声和干扰敏感, 由于数字调制信号均具有循环平稳特性, 这种特性将体现信号特征参数(码元宽度、载频等)紧密地联系起来。实践证明, 充分利用信号的循环平稳特性实现噪声和干扰中信号的检测将大大的优于传统的方法。一般来说, 建立在循环平稳理论基础之上的循环特征检测器可分为多循环检测器和单循环检测器。若利用循环谱密度函数作为检验统计量, 则前者是所有循环频率上谱线强度的累积和, 因此需要知道各个循环频率的先验知识, 这对信号截获方来说是极不现实的; 后者是针对某一特定循环频率上谱线

强度作为检验统计量, 但也应具有该循环频率的先验知识。如果仅知道接收信号的码元宽度, 则可采用循环谱分析器。它是一种特殊的单循环检测器, 即采用一个与码元宽度相匹配的时窗或者码元速率相匹配的频窗在循环谱估计过程中进行平滑, 然后通过搜索与信号循环频率相联系的离散谱线完成对信号的检测和参数估计。文献[7]系统地阐述了信号的循环平稳理论。文献[8, 9]以BPSK和QPSK为例详细地分析和比较了多种二次检测器与循环特征检测器的联系和区别, 并对各种检测器的性能进行了评估。文献[10,11]在综合多循环检测器和单循环检测器的基础上, 提出了有限多循环检测器, 这种检测器将多循环检测器的无穷项直接求和改为 11 个循环频率处(实际上是 11 个单循环检测器)的包络求和, 避免了多循环检测器的破坏性相加, 同时也提高了单循环检测器的性能。但是这种检测器需要同时获得载频和码元宽度的信息或者需要准确地估计这些参数, 这对于信号截获方来说并非易事; 如果参数估计不准, 其检测性能将会急剧下降。本文在深入研究CPM信号的循环平稳特性和综合比较循环特征检测器的基础上提出一种改进的循环谱分析器。该检测器不必知道信号的码元宽度, 且只需一维搜索。仿真结果表明, 该检测器能够在低信噪比下, 对调制指数为整数和半整数的CPM信号进行有效的检测。

2 CPM 的信号模型及其循环谱密度表示

连续相位调制信号^[12]的一般表达式为

$$x(t) = \text{Re} \left[v(t) e^{j2\pi f_c t} \right] = \cos \left[2\pi f_c t + \phi(t, a_n) + \phi_0 \right] \quad (1)$$

其中 $\phi(t, a_n)$ 表示载波的时变相位,

$$\begin{aligned}\phi(t, a_n) &= 2\pi h \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k q(t - kT) \\ &= \pi h \sum_{k=-\infty}^{n-L} a_k + 2\pi h \sum_{k=n-L+1}^n a_k q(t - kT) \\ &= \theta_n + \theta(t, a_n), \quad nT \leq t \leq (n+1)T\end{aligned}\quad (2)$$

$$q(t) = \int_{-\infty}^t g(t) dt = \begin{cases} 1/2, & t \geq LT \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$h = 2f_d T \quad (4)$$

其中 a_n 表示幅度序列, 它是由信息序列 $\{a_n\}$ 的 k bit 二进制数字组映射到幅度电平 $\{\pm 1, \pm 3, \dots, \pm(M-1)\}$ 得到的。 $g(t)$ 是一个幅度为 $1/(2T)$, 持续时间为 T s 的矩形脉冲(在 CPM 中又叫频率成形函数), $q(t)$ 是相位成形函数, θ_n 表示直到 nT 时的相位累积, $\theta(t, a_n)$ 表示 $nT \leq t \leq (n+1)T$ 时间内的相位变化, f_d 是峰值频率偏移, h 称为调制指数, L (取正整数)表示脉冲长度, $L=1$ 时称为全响应信号, $L>1$ 时称为部分响应信号, 由式(3)可以看出, 不同的 $g(t)$ 将形成不同的相位响应函数, 常见的频率响应函数^[13]有矩形脉冲、升余弦脉冲以及高斯脉冲等。对于全响应二进制 CPM 信号, 其复包络可以表示为

$$v(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp \left\{ j \left[2\pi f_d a_n (t - nT) + 2\pi f_d T \sum_{r=-\infty}^{\infty} a_r \right] \right\} p_T(t - nT) \quad (5)$$

其中 a_n 是取 ± 1 的独立同分布的随机序列, 且 $p_T(t)$ 及其傅里叶变换 $Q_T(f)$ 可以表示为

$$p_T(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T, \\ 0, & \text{others}, \end{cases} \quad Q_T(f) = \frac{\sin(\pi f T)}{\pi f} \quad (6)$$

对于部分响应二进制 CPM 信号, 其复包络可以表示为

$$v(t) = \exp \left[j 2\pi h \sum_{k=-\infty}^{\infty} I_k q(t - kT) \right] \quad (7)$$

文献[14,15]推导出了 CPM 信号的基带循环谱和基带共轭循环谱, 文献[16]分析了 CPM 带通信号的循环平稳特性, 对全响应 CPM 信号的循环谱幅度有如下结论^[16]:

(1) 当调制指数为整数时, CPM 信号的循环谱幅度在 $f=0$ 的 α 截面上, 当 $\alpha = \pm 2f_c \pm 2f_d$ 时取得较大非零值, 而在其它地方取值较小或者为零。

(2) 当调制指数为半整数(0.5 的奇数倍)时, CPM 信号的循环谱幅度在 (f, α) 双频率平面上的特征与式(1)中类同, 只是谱线或谱峰的强度有所不同。如图 1(a)所示。

对部分响应 CPM 信号的循环谱幅度有如下结论:

(1) 调制指数为奇整数 ($h=2p+1$, p 为正整数)时, 在 $f=0$ 的 α 截面上, 当 $\alpha = \pm 2f_c$ 将有最大强度的谱线产生, 另外, 在

$\alpha = \pm 2f_c + (2k+1)/T = \pm 2f_c + (2k+1) \times 2f_d/h$, $k \in \mathbb{Z}$ (8) 的地方均有谱线产生, 但 $h=|2k+1|$ 时将有仅次于 $\alpha = \pm 2f_c$

处的较大强度的谱线。

(2) 调制指数为偶整数时, 在 $f=0$ 的 α 截面上, 当 $\alpha = \pm 2f_c + 2k/T = \pm 2f_c + 2k \times 2f_d/h$ 的地方将有较大强度的谱线出现, 其中, $\alpha = \pm 2f_c$ 处将产生最大强度的谱线, $h=|2k|$ 时次之, 其它地方的谱线强度较弱。如图 1(b)所示。

(3) 调制指数为半整数时, 在矩形成型脉冲的情况下, 在 $f=0$ 的 α 截面上 $\alpha = \pm 2f_c \pm 2f_d$ 的地方谱线较弱, 且有较多毛刺。但在升余弦脉冲和高斯脉冲的情况下, 谱线强度较大。

(4) 与相同调制指数的全响应 CPM 信号相比, 联系码元周期 T 或峰值频偏 f_d 的循环频率处的谱线强度要弱一些, 其基本原因是由于部分响应 CPM 信号的频率响应函数的脉冲长度 $L>1$, 使信号变得更加平滑, 体现信号周期性的循环谱线受到了一定程度的影响。

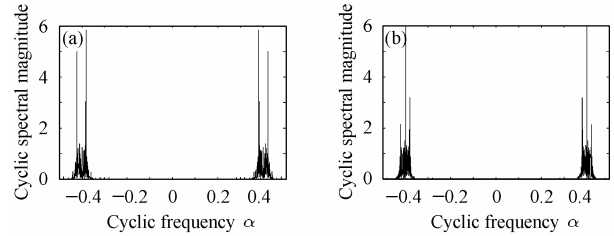


图 1 调制指数 h 为整数或半整数的 CPM 信号

$f=0$ 的 α 截面的循环谱线图

(a) 全响应 CPM 信号 (b) 部分响应 CPM 信号

3 高斯白噪声下 CPM 信号的检测

对加性高斯白噪声背景下 CPM 信号的存在性进行检测是一个二元假设检验问题, 即

$$H_0: s(t) = n(t), \quad H_1: s(t) = x(t) + n(t) \quad (9)$$

其中 $x(t)$ 是 CPM 形式的有用信号, $n(t)$ 是高斯白噪声, $x(t)$ 和 $n(t)$ 统计独立。由于噪声不具有循环平稳性, 其循环谱密度只在 $\alpha=0$ 处出现谱峰, 而对于所有的调制指数为整数和半整数的 CPM 信号, 由前面的分析可知, 在 $f=0$ 的 α 截面上, $S_x^\alpha(f)$ 在 $\alpha = \pm 2f_c \pm 2f_d$ 处均有离散的谱峰。如图 1 所示。因此要对 CPM 信号的存在性进行检测, 可计算观测数据 $s(t)$ 的循环谱密度函数, 根据下式进行判决,

$$|S_s^\alpha(f)|_{f=0} = \begin{cases} |S_x^\alpha(f)|_{f=0}, & \alpha \neq 0, \text{ 有信号} \\ |S_x^0(f) + S_n^0(f)|_{f=0}, & \alpha = 0, \text{ 有信号} \\ 0, & \alpha \neq 0, \text{ 无信号} \\ |S_n^0(f)|_{f=0}, & \alpha = 0, \text{ 无信号} \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可以看出, 循环谱检测器具有很强的信号选择性和分辨能力, 由引言可知, 传统的循环谱分析器为了在循环谱估计过程中准确地设定时域平滑或频域平滑的窗宽, 因此要求已知信号的码元宽度。实际上在循环谱估计过程中, 只要平滑窗的宽度能分辨出循环频率的最小单元即可实现信号的检测。在本文中, 我们假设仅知道信号结构(即为 CPM 信号)和信号的大致带宽, 以所知道的大致带宽或大致带宽的一

半作为循环谱估计过程中频域平滑的窗宽,以循环谱幅度作为检验统计量完成对信号的检测。因此我们的检测过程基于如下的假设:

$$Z \square \left| \frac{1}{\Delta f} \int_{f-\Delta f/2}^{f+\Delta f/2} S_{\alpha}^{\alpha}(t, f) df \right| \Rightarrow \begin{cases} > \gamma & H_1 \\ < \gamma & H_0 \end{cases} \quad (11)$$

这实际上是一个频域平滑的循环谱分析器。通过在有效频带内对循环谱幅度平面的搜索,获取对信号的检测结果。其中, Δf 是频域平滑窗的窗宽, γ 是检测门限, H_1 表示信号存在, H_0 表示信号不存在。联系式(10)和式(11),我们可以进一步比较一下能量检测器 ($\alpha=0$) 和循环特征检测器 ($\alpha \neq 0$) 的差别,从式(10)可以看出,能量检测器不论信号出现与否,在 $\alpha=0$ 时总有一定强度谱线产生,为了检测信号,能量检测器只能在 $\alpha=0$ 处区分信号、噪声和干扰。这对于信号处在时变噪声或干扰存在的背景中,无疑对其检测门限的设置带来困难。而对于循环特征检测器,只有在有信号时,在 $\alpha \neq 0$ 处才会有较大强度的谱线产生,为了检测信号,循环特征检测器只需判别在 $\alpha \neq 0$ 处是否有较大强度的谱线产生即可,其检测机理显然优于能量检测器。

4 仿真结果及性能分析

对低信噪比信号检测性能评估的一种重要方法是确定在一定条件下虚警概率(P_f)与检测概率(P_d)的关系,即接收机工作特性 (Receiver Operating Characteristic, ROC) 曲线^[6,8,9]。因此本文中主要采用接收机工作特性曲线对各检测器的性能进行评估。

在进行仿真实验之前我们做出以下假设:

(1) 对来波信号的先验知识假设仅知道信号结构(即为 CPM 信号)和大致带宽。

(2) 实验假设信号所处的环境为平稳高斯白噪声或时变高斯白噪声两种情况下。

(3) 假设一种情况下能量检测器的中心频率正好对准信号的中心频率,其大致带宽为信号码元速率的 2 倍(实际上 CPM 信号的主瓣宽度小于码元速率的 2 倍),这种情况下,能量检测器将最大限度地实现能量的累积而获得极佳的检测效果。而循环谱分析器的频域平滑的窗宽 Δf 设为码元速率的 $1/2 \square 1/4$, 此时循环谱分析器以 $\pm 2f_c$ 作为起点(见图 1)在 $f=0$ 的 α 截面上左右搜索最大值,其搜索范围可设置为大致带宽的 2 倍。另一种情况则假设能量检测器的中心频率没有对准信号的中心频率,与真实中心频率存在误差,这种情况下能量检测器的检测性能将变差。循环谱分析器的检验统计量则改为搜索整个 $f=0$ 的 α 截面取谱线最大值得到,同载频已知的情況相比将增大搜索量,但可以换来很好的检测效果。见图 2 和图 3(b)。

(4) 仿真采用的参数为: 采样频率 $f_s=1\text{Hz}$ (归一化), 载频 $f_c=f_s/5$, 码元数 $N=100$ 个, 码元宽度 $T_c=50$ (即码元速率 $f_0=1/T_c=0.02f_s$), 数据长度 4096 点, 实验次数均为 1000

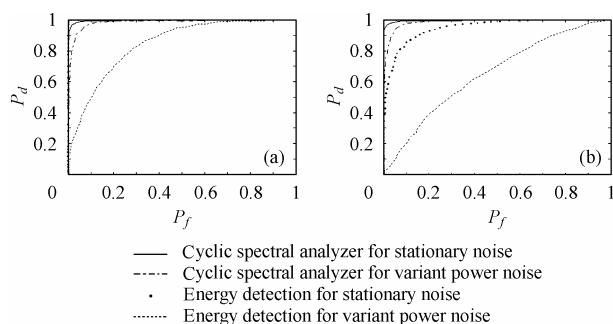


图2 -15dB, $h=0.5$ 的情况下全响应 CPM 信号检测的 ROC 曲线

(a)无载频误差 (b)载频误差 10%

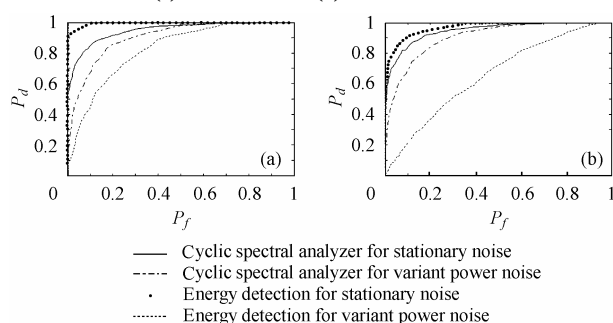


图3 -15dB, $h=1, L=2$ 的情况下部分响应

CPM 信号检测的 ROC 曲线

(a)无载频误差 (b)载频误差 10%

次, 信噪比采用 $10\lg(1/\sigma^2)$ 定义, σ^2 为噪声方差。为节省篇幅, 本文仅以调制指数 $h=0.5$ 的全响应 CPM 信号以及调制指数 $h=1$ 的部分响应 CPM 信号为例进行仿真说明, 其它情况与图 2, 图 3 的情况类同。

从图 2 和图 3(a)可以看出, 当没有载频误差时, 在 -15dB 的情况下, 本文所提出的循环特征检测器与传统的能量检测器在平稳高斯白噪声背景下均达到了 100% 的检测概率, 而在时变高斯白噪声背景下, 循环特征检测器已渐进达到 100% 的检测概率, 但此时的能量检测器性能急剧下降; 当存在 10% 的载频误差时(图 2, 图 3(b)), 循环特征检测器的性能几乎不受影响, 能量检测器的性能则下降得较快。同时, 比较图 2 和图 3 可以看出, 循环特征检测器对部分响应 CPM 信号的检测性能较之全响应 CPM 信号的检测性能有所下降, 其基本原因是由于部分响应 CPM 信号的基带成形脉冲长度 $L>1$, 使其信号变得更加平滑, 体现信号周期性的循环谱线受到了一定程度的影响。从前面的仿真结果可以看到, 载频误差对本文所提出的循环特征检测器的影响较小, 而对能量检测器的影响较大, 这是因为仿真中假设信号带宽为 2 倍码元速率, 当存在载频误差时, 能量检测器的中心无法对准信号的中心频率, 自然导致检测性能变差; 而循环特征检测器采用搜索整个 $f=0$ 的 α 截面(实际仿真中采用搜索 5 倍信号带宽)取非零最大值作为检验统计量, 因而受影响较小, 从这个方面来说, 本文所提出的循环特征检测器虽然在计算量上大于能量检测器, 但在性能上却远远优于能量检测器。

5 结束语

本文根据调制指数为整数或半整数的连续相位调制信号的循环平稳特性, 提出一种在未知编码序列、载频、码元宽度及峰值频率偏移等参数的情况下对 CPM 信号的检测方法, 该方法充分利用了 CPM 信号在传统傅里叶频率和循环频率双频率平面上的谱线特征, 仿真结果表明, 在平稳高斯白噪声下循环特征检测器对 CPM 信号的检测性能已渐进达到能量检测器的水平, 在时变高斯白噪声下前者远远超过后者的检测能力。

参 考 文 献

- [1] Lampe L H -J, Tzschoppe R, Huber J B, *et al.*. Noncoherent continuous-phase modulation for DS-CDMA. ICC '03. IEEE International Conference on Communications, Helsinki, 2003: 11-15.
- [2] Lok T M, Lehnert J S. DS/SSMA communication system with trellis coding and CPM. *IEEE Journal on Selected Areas Communications*, 1994, 12(5): 716-722.
- [3] Tasadduq I A, Rao R K. PAPR reduction of OFDM signals using multi-amplitude CPM. *Electronics Letters*, 2002, 38(8): 915-917.
- [4] Tasadduq I A, Rao R K. Detection of OFDM-CPM signals over multipath channels. Proc. IEEE International Conference on Communications, Kingston, ON, Canada. 2002: 1651-1655.
- [5] Urkowitz H. Energy detection of unknown deterministic signals, *Proc. IEEE*, 1967, 55: 523-531.
- [6] Mills R F. A comparison of various radiometer detection models. *IEEE Trans. on AES*, 1996, 32(1): 467-473.
- [7] Gardner W A. Statistical Spectral Analysis: A Nonprobabilistic theory. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1987: 355-537.
- [8] Gardner W A. Signal Interception: A unifying theoretical framework for feature detection, *IEEE Trans on Communications*, 1988, 36(8): 897-906.
- [9] Gardner W A. Signal interception: Performance advantages of cyclic-feature detectors. *IEEE Trans. on Communications*, 1992, 40(1): 149-159.
- [10] 黄春琳, 姜文利, 周一宇. 对低截获概率相位编码信号检测的有限多循环检测器. 电子学报, 2002, 30(6): 916-918.
- [11] 黄春琳, 姜文利, 周一宇. 窄带强干扰下直接扩谱序列信号的有限多循环检测器. 通信学报, 2003, 24(3): 105-112.
- [12] Proakis J G. Digital Communications. Third Ed. New York: McGraw-Hill, 1995: 185-201.
- [13] Sundberg C E. Continuous phase modulation. *IEEE Communications Magazine*, 1986, 24(4): 25-38.
- [14] Gournay P, Viravau P. Corrélation spectrale théorique des modulations CPM-Partie I: Resultat analytique pour les modulations CPFSK à 2 états(1REC). *Ann. Télécommun*, 1998, 53(7-8): 267-278.
- [15] Viravau P, Gournay P. Corrélation spectrale théorique des modulations CPM-Partie II: Mthode de calcul générale et analyse. *Ann. Télécommun*, 1998, 53(7-8): 279-288.
- [16] 张仔兵, 李立萍, 肖先赐. 连续相位调制信号的二阶循环平稳特性分析. 电子与信息学报, 2005, 27(11): 1726-1731.

张仔兵: 男, 1968 年生, 博士生, 研究方向为循环平稳信号处理、低信噪比条件下的信号检测与参数估计。

李立萍: 女, 1963 年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为无源定位、阵列信号处理、复杂环境中的信号检测与参数估计。

肖先赐: 男, 1933 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为谱估计与阵列信号处理、混沌信号处理、人工神经网络、非线性信号处理、电子系统等。