

文章编号: 2095-4980(2013)06-0948-05

基于瞬时幅度特征的连续相位调制信号识别

彭华甫¹, 江桦¹, 裴立业¹, 郭峰²

(1.信息工程大学 信息工程学院, 河南 郑州 450002; 2.济南军区司令部, 山东 济南 250000)

摘要: 针对非合作通信系统中连续相位调制(CPM)信号识别难的问题, 提出一种CPM信号识别新方法。算法以信号的瞬时幅度谱为特征, 结合谱线检测, 实现了CPM信号与幅移键控(ASK)、正交幅度调制(QAM)、相移键控(PSK)、频移键控(FSK)信号的区分。算法无需各种参数估计及同步等预处理过程, 仿真实验结果表明, 在信噪比不小于4 dB时, CPM信号正确识别率达到95%以上。与已有算法相比, 本文所提算法具有计算量小、实现简单和低信噪比下识别率高等优点。

关键词: 信号识别; 连续相位调制; 瞬时幅度; 谱线检测

中图分类号: TN911.72

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201306.0948

Classification algorithm for CPM signals based on instantaneous amplitude

PENG Hua-fu¹, JIANG Hua¹, PEI Li-ye¹, GUO Feng²

(1.School of Information Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou Henan 450002, China; 2.Jinan Military Region Command, Jinan Shandong 250000, China)

Abstract: In the non-cooperation communications system, it is difficult to recognize Continuous Phase Modulation(CPM) signals. A novel method for the recognition of CPM signals is proposed to solve this problem. By combining spectrum line test, the signals instantaneous amplitude spectrum features are employed to distinguish CPM signals from Amplitude Shift Keying(ASK), Frequency Shift Keying(FSK), Phase Shift Keying(PSK), Quadrature Amplitude Modulation(QAM) signals. The method obviates the requirements of preprocessing tasks like estimation of parameters and synchronization. Simulation results show that the correct classification rate of CPM signals is above 95% under 4 dB SNR. Compared with existing methods, the proposed method which has lower computational costs and higher recognition probability is easy to be implemented.

Key words: modulation identification; Continuous Phase Modulation; instantaneous amplitude; spectrum line test

近年来,随着通信技术的发展,人们对宽带数据业务的需求也日趋上升,CPM以其恒包络和良好的频谱特性(窄主瓣、快速滚降的旁瓣),越来越受到人们的关注,在民事和军事都具有十分广泛的应用。自动调制识别作为信号检测与解调的中间步骤,在感知无线电、电子侦察等方面均扮演着重要角色,该技术已被考虑纳入未来自适应通信标准^[1]。在通信电子支援中,首先需要识别信号的调制方式。因此,从日益复杂的电磁环境中如何快速有效地识别CPM信号,是通信对抗和信号解调的一个重要环节。

目前对数字信号自动识别方面的研究主要围绕瞬时特征^[2]、小波变换^[3]、高阶累积量^[4]、循环平稳^[5]等方法进行研究,如何在低信噪比下快速准确地识别信号调制方式,是该领域的研究难点。数字调制信号识别方法已有很多,大多针对无记忆的数字调制信号,但针对CPM信号识别方面的研究相对较少。文献[6]利用信号二次方与四次方形式傅里叶变换的谱线特征实现了MPSK($M=2,4,8$)与CPM($h=0.5$)信号区分,利用反映信号包络变化程度的特征量完成8PSK与CPM($h=0.5$)信号识别,但该方法仅能实现恒包络数字调制信号的识别,没有考虑MASK, MQAM信号,且对信噪比要求较高。CPM作为一种有记忆的调制方式^[7],许多传统的识别方法无法直接应用,如何在非合作接收环境下实现CPM信号识别是一大难点。本文在对各类数字调制信号瞬时幅度信息进行分析的基础上,通过提取其频域特征,有效降低了噪声对其的影响,实现了CPM信号与ASK,FSK,PSK,QAM信号区分。

1 信号模型

1) 连续相位调制信号

CPM 信号是一类非线性调制信号, 载波相位是连续的, 且具有记忆性^[8], 其一般形式为:

$$s_{\text{CPM}}(t) = \exp \left\{ j \left[2\pi f_c t + 2\pi \int_{-\infty}^t \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n h_n p(u - nT_s) du \right] \right\} = \exp \left\{ j \left[2\pi f_c t + 2\pi \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n h_n \varphi(t - nT_s) \right] \right\} \quad (1)$$

式中: f_c 为载波频率; h_n 为调制指数, 在 $\{h_1, h_2, \dots, h_{N_h}\}$ 中循环取值, $N_h=1$ 时为单调制指数 CPM 信号; $\{a_n\}_{n \in \mathbb{Z}}$ 为发送的符号序列, 等概率地取自 $\pm\{1, 3, \dots, (M-1)\}$, M 为进制数; T_s 为符号周期; $\varphi(t - nT_s)$ 为第 n 个符号周期的相位冲激响应, 有:

$$\varphi(t) = \int_0^t p(u) du \quad (2)$$

$p(t)$ 为频率成型脉冲, 仅在区间 $[0, LT_s]$ 内取非零正值, 且满足 $\int_0^{LT_s} p(t) dt = 1$, 常见的有矩形脉冲、升余弦脉冲、高斯脉冲等。正整数 L 为频率成型脉冲长度, $L=1$ 时称为全响应 CPM 信号, $L>1$ 时称为部分响应信号。

2) 相位非连续调制信号

ASK, QAM, PSK, FSK 信号作为常见的数字调制信号, 在码元变化时刻相位是非连续的, 可表示为:

$$s(t) = \tilde{s}(t) \exp[j(2\pi f_c t + \theta_c)] \quad (3)$$

式中: θ_c 为载波相位; $\tilde{s}(t)$ 为基带调制信号, 且有^[9]:

$$\tilde{s}_{\text{ASK}}(t) = \sum_{i=0}^{+\infty} a_i g(t - iT) \quad (4)$$

$$\tilde{s}_{\text{FSK}}(t) = \sum_{i=0}^{+\infty} \exp[j(2\pi f_i t + \theta_i)] g(t - iT) \quad (5)$$

$$\tilde{s}_{\text{PSK}}(t) = \sum_{i=0}^{+\infty} \exp(j\varphi_i) g(t - iT) \quad (6)$$

$$\tilde{s}_{\text{QAM}}(t) = \sum_{i=0}^{+\infty} (a_i + jb_i) g(t - iT) \quad (7)$$

式中: $a_i \in \{2m-1-M, m=1, 2, \dots, M\}$ 为 ASK 信号幅度; $f_i \in \{f_1, f_2, \dots, f_M\}$; $\theta_i \in (0, 2\pi)$ 为 FSK 信号频率和相位; $\varphi_i \in \{\frac{2\pi}{M}(m-1), m=1, 2, \dots, M\}$ 为 PSK 信号的相位; $a_i, b_i \in \{2m-1-M, m=1, 2, \dots, M\}$ 为 QAM 信号的正交分量; $g(t)$ 为信号脉冲; T 为符号周期。

2 CPM 信号识别

常见的 ASK, FSK, PSK, QAM 及 CPM 数字调制信号, 在信号的幅度、相位或频率上反映了与信号调制方式相关的信息。对信号 $s(t)$ 进行 Hilbert 变换, 求得其瞬时幅度为:

$$a(t)_{\text{ASK}} = \sum_{k=0}^{+\infty} a_k g(t - kT) \quad (8)$$

$$a(t)_{\text{FSK, PSK}} = \sum_{k=0}^{+\infty} g(t - kT) \quad (9)$$

$$a(t)_{\text{QAM}} = \sum_{k=0}^{+\infty} \sqrt{a_k^2 + b_k^2} g(t - kT) \quad (10)$$

$$a(t)_{\text{CPM}} \equiv C \quad (11)$$

由式(8)~式(11)可以看出: ASK, FSK, PSK, QAM 信号的瞬时幅度是由信号脉冲 $g(t)$ 所组成的, 且是以 T 为周期的周期函数; CPM 信号因相位连续其瞬时幅度为常数。

对于 ASK, QAM 信号, 在同一码元内, 各信号的幅度值均为常数, 不同码元内, ASK, QAM 信号幅度与发送的码元有关, 呈现阶梯状, 图 1 中 A 为 QASK 信号瞬时幅度, 其在码元持续时间内为常数, 瞬时幅度有 4 种状态; 图 1(b)为 16QAM 信号瞬时幅度, 有 3 种状态。PSK 为相位编码, 其瞬时幅度是基带脉冲组成的周期函数^[10],

图 1(c)为二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)信号瞬时幅度, 其在码元变化时刻瞬时幅度有突变; FSK 信号在码元变化时信号频率会有突变, 从而引起幅度的突变, 如图 2(d)为二进制频移键控(Binary Frequency Shift Keying, BFSK)信号瞬时幅度, 其在码元变化时刻有突变。

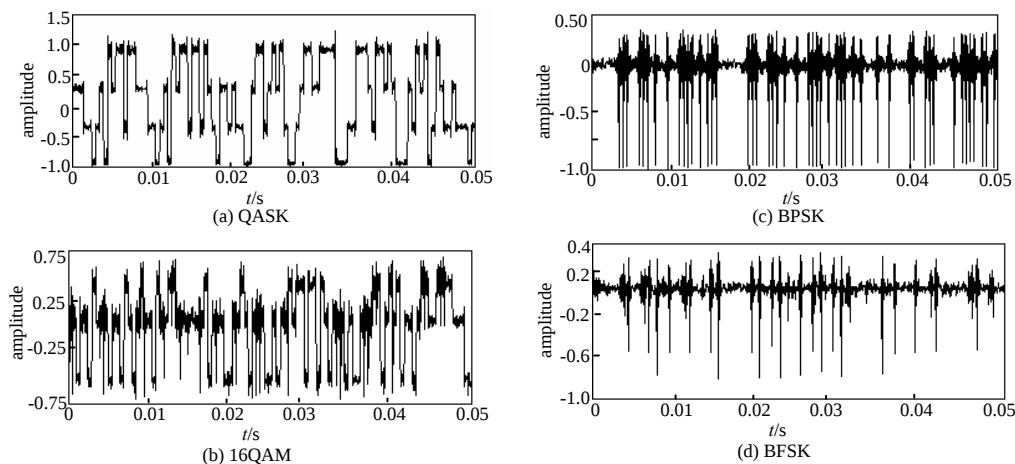


Fig.1 Instantaneous amplitude of digital modulation signals

图 1 数字调制信号瞬时幅度

分析发现: CPM 信号瞬时幅度为常数, 其瞬时幅度在码元变化时刻无突变, 而其他信号在码元变化时会出现奇异点。因此, 可依此提取特征参数从而实现 CPM 信号与其他数字调制信号的区分。

观察各调制信号的瞬时幅度发现: 码元状态变化时, ASK, QAM, PSK, FSK 信号瞬时幅度会发生突变, 具有明显的周期特征, 因此对其进行傅里叶变换会出现反映周期性的离散谱线。图 2(a)、图 2(b)分别为四相移相键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK), BFSK 信号瞬时幅度谱, 可以看出其具有明显的离散谱线特征, FSK 信号包络中还含有调制频率信息^[11], 除符号速率整数倍位置有离散谱线外还存在其他谱线。CPM 信号瞬时幅度是恒定的, 其瞬时幅度谱无离散谱线特征, 如图 2(c)所示。

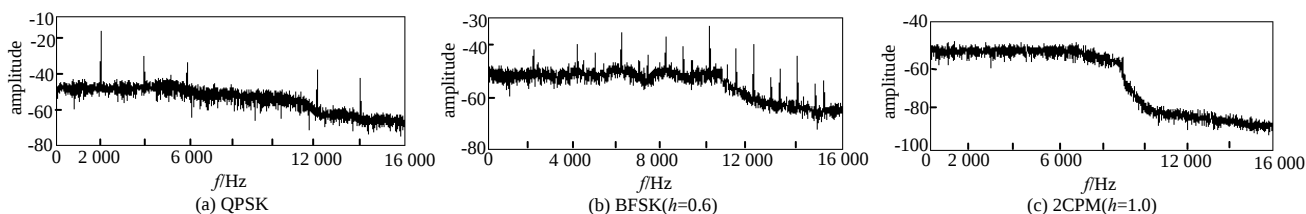


Fig.2 Instantaneous amplitude spectral of signals

图 2 信号瞬时幅度谱

通过以上分析发现, 对于非记忆的 ASK, QAM, PSK, FSK 信号, 在码元变化时会有瞬时幅度的突变, 在其幅度谱中会表现出谱线特征; 而 CPM 信号无突变发生, 其幅度谱无谱线特征。由此, 通过检测信号瞬时幅度谱是否有离散谱线, 可以有效区分 CPM 同 ASK, QAM, PSK, FSK 信号。

3 识别过程

求得信号瞬时幅度谱后, 为有效识别 CPM 信号, 需检测是否存在离散谱线。采用滑动—平均—比较(Moving Averaging Comparing, MAC)的非线性处理方法, 可增强谱线能量^[11], 同时又可克服色噪声及频谱起伏等各种因素对谱线检测的影响。其基本原理是: 当前频点的幅度谱与其两侧一定范围的幅度谱均值相比, 信号瞬时幅度谱为 $A(f)$, 则其相应的 MAC 谱 $A_{MAC}(f)$ 为:

$$A_{MAC}(f) = \frac{A(f)}{\frac{1}{N} \sum_{i=-N}^{-1} A(f+i) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A(f+i)} \quad (12)$$

式中 N 为平滑窗长度。

MAC 谱需要对整个频率范围进行处理, 可有效抑制连续谱, 并增强离散谱。图 3(a)为 BASK 信号的瞬时幅度谱, 其中包括连续谱和离散谱, 对其进行 MAC 处理后, 有效消除了连续谱的影响, 增强了信号的离散谱, 从

而提高了谱线检测的准确度,见图3(b)。

通过检测幅度谱离散谱线的有无,即可实现 CPM 信号同其他信号的区分。因此,本文提出 CPM 信号调制方式识别方法具体步骤如下:

- 1) 对接收到的频带信号进行 Hilbert 变换,提取其瞬时幅度信息;
- 2) 进行 FFT 变换,求得信号瞬时幅度谱 $A(f)$,并计算其 MAC 谱 $A_{MAC}(f)$,以增强离散谱线特征;
- 3) 取 $A_{MAC}(f)$ 中最大值与门限 Γ 进行比较, $\max[A_{MAC}(f)] < \Gamma$ 则判为 CPM 信号,否则为其他信号。

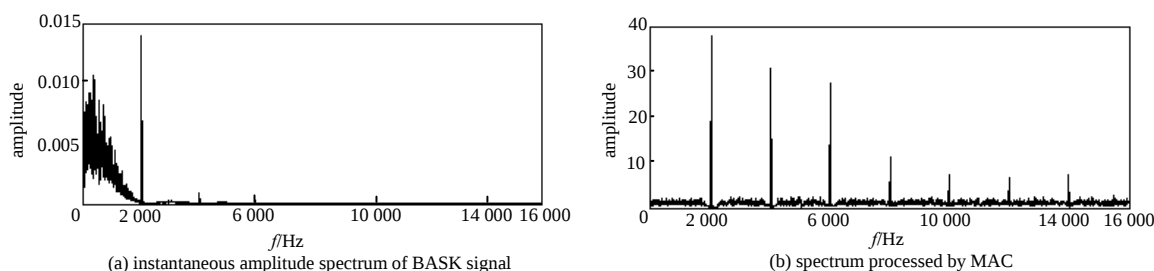


Fig.3 Spectral line enhanced by MAC
图3 基于MAC方法的谱线增强

4 仿真实验

为验证本文所提出的特征参数的可靠性及信号分类方法的有效性,利用 LabVIEW 仿真产生 MASK(2,4,8),MFSK(2,8),MPSK(2,4,8),CPM,MQAM(16,32)信号进行仿真实验。仿真参数设置为:采样率 $f_s = 32\text{ kHz}$,载频 $f_c = 8\text{ kHz}$,符号速率为 2 kHz ,样本长度为 2000 ,FSK 信号调制指数为 0.3 ,CPM 信号调制指数 $h = p/q$ 在 $(0,1)$ 间随机取值,噪声为高斯白噪声,MAC 谱平滑窗长度为 51 。

在不同信噪比下分别进行 100 次独立仿真实验,设置谱线检测门限 $\Gamma = 10$ (经试验反复验证),针对不同调制类型信号瞬时幅度谱的离散谱线进行检测,其检测概率即为 CPM 同该信号的识别概率。CPM 信号与不同调制类型信号的正确识别概率 $P_c\{\text{CPM}/[\text{CPM}, S]\}$,其中 $S \in \{\text{MASK}(2,4,8), \text{MFSK}(2,8), \text{MPSK}(2,4,8), \text{MQAM}(16,32)\}$,见图4。从图4中可以看出:采用本文识别方法,在信噪比为 0 dB 即可区分 CPM 同 PSK 信号,而文献[6]在信噪比大于 8 dB 时才能完全区分 CPM 同 PSK 信号,且未考虑 CPM 同其他信号的区分;在信噪比大于 4 dB 时,本文算法可实现任意调制指数 CPM 信号同 ASK,PSK,QAM,FSK 的识别。此外,算法的识别性能与谱线增强算法及所选择的阈值也有一定关系。

5 结论

不同调制类型的信号会在其瞬时幅度、频率、相位上表现出不同的特征。相位非连续的 ASK,QAM,PSK,FSK 信号,会在码元变化时刻产生相位突变;而 CPM 信号相位是连续的无突变,由此,通过提取特征参数可将相位连续的 CPM 信号与其他信号区分开来。本文主要利用信号瞬时信息,与基于累积量、循环平稳特征的方法相比具有计算量小、识别过程相对简单、工程上易实现的优点;且基于信号瞬时幅度的频域特征,与基于信号瞬时信息的统计特征相比可有效降低噪声对其的影响。通过检测离散谱线的有无实现 CPM 信号与其他信号的区分,在信噪比不小于 4 dB 时,CPM 信号正确识别率大于 95% 。

参考文献:

- [1] Wu H C, Saquib M, Yun Z. Novel automatic modulation classification using cumulant features for communications via multipath channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(8):3098-3105.
- [2] 谭晓衡, 鄢海燕, 苏萌. 基于自适应小波消噪的数字调制识别优化算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(2):466-469. (TAN Xiaoheng, YAN Haiyan, SU Meng. An Optimal Algorithm of Digital Modulation Recognition Based on Adaptive Wavelet

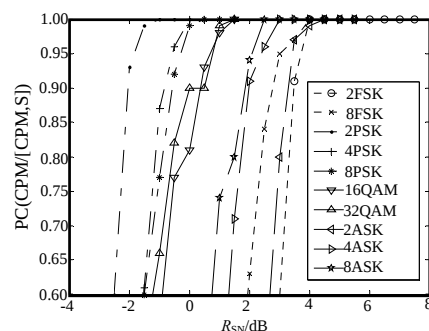


Fig.4 Detection rate of CPM and other digital modulation signals
图4 CPM信号与其他数字调制信号识别概率

- De-noising[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2011,33(2):466-469.)
- [3] 陈韬伟,辛明. 基于小波变换的雷达辐射源信号特征提取[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2010,8(4):436-440. (CHEN Taowei, XIN Ming. Feature extraction based on wavelet transform for radar emitter signals[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2010,8(4):436-440.)
- [4] 刘明骞,李兵兵,赵雷. 多径信道下 OFDM 信号子载波的调制方式识别新方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2011,38(5):20-26. (LIU Mingqian, LI Bingbing, ZHAO Lei. Novel modulation identification scheme for subcarriers of OFDM signals in the multipath channel[J]. Journal of Xidian University, 2011,38(5):20-26.)
- [5] 崔伟亮,李剑强,江桦,等. 衰落信道盲接收条件下的调制分类[J]. 电子与信息学报, 2011,33(8):1895-1901. (CUI Weiliang, LI Jianqiang, JIANG Hua, et al. Modulation Classification Algorithm in Fading Channels under Blind Reception Conditions [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2011,33(8):1895-1901.)
- [6] 杨琳,许小东,路友荣,等. 基于谱线特征的恒包络数字调制方式识别方法[J]. 中国科学技术大学学报, 2009,39(9): 936-943. (YANG Ling, XU Xiaodong, LU Yourong, et al. Spectrum line based modulation classification for constant modulus digital modulation signals[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2009,39(9):936-943.)
- [7] G Cariolaro, T Erseghe, N Laurenti. New Results on the Spectral Analysis of Multi-h CPM signals[J]. IEEE Transactions on Communications, 2011,59(7):1893-1903.
- [8] 李娟. 连续相位调制信号的信噪比估计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2010,8(1):71-75. (LI Juan. An estimation algorithm for the SNR of continuous phase modulation signal[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2010,8(1):71-75.)
- [9] 刁文静,张建立. 一种小波变换与 FFT 相结合的波特率估计新算法[J]. 通信对抗, 2006(2):18-21. (DIAO Wenjing, ZHANG Jianli. A New Kind of Arithmetic for Baud-Rate Estimation with Combination of Wavelet Transform and FFT[J]. Communication Countermeasures, 2006(2):18-21.)
- [10] 张晓勇,罗来源,罗武忠. 一种基于瞬时幅度的 PSK 信号符号速率估计方法[J]. 信号处理, 2008,24(2):316-319. (ZHANG Xiaoyong, LUO Laiyuan, LUO Wuzhong. A Method for Estimating Symbol Rate of PSK Modulated Signals Based on the Instantaneous Amplitude[J]. Signal Processing, 2008,24(2):316-319.)
- [11] 徐毅琼. 数字通信信号自动调制识别技术研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2011. (XU Yiqiong. Research on Automatic Modulation Recognition of Digital Communication Signals[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2011.)

作者简介:



彭华甫(1987-), 男, 湖北省安陆市人, 助理工程师, 硕士, 主要研究方向为通信信号处理. email: penghuafu@sina.com.

江桦(1956-), 男, 江苏省南通市人, 教授, 博士生导师, 研究方向为通信信号处理、电磁频谱监测.

裴立业(1987-), 男, 石家庄市人, 在读硕士研究生, 研究方向为通信信号处理.

郭峰(1978-), 男, 山东省成武县人, 硕士, 研究方向为军事指挥.