

一种单信道时频重叠多进制数字相位调制信号调制识别方法

曾创展¹ 贾鑫²

(装备学院研究生管理大队¹, 光电装备系², 北京 101416)

摘 要 针对单信道两个时频重叠多进制数定相位调制 (multiple phase shift keying, MPSK) 信号的调制识别问题, 提出了一种基于联合特征参数的调制识别方法。根据时频重叠信号在循环频率上的可分性, 结合信号的瞬时自相关特性, 提出了两个特征参数, 对任意组合的双相移键控信号 (共 6 种) 进行分类识别。仿真结果表明, 在信噪比大于 6 dB 时, 各信号组合的平均正确识别率能达到 90%。

关键词 调制识别 单信道时频重叠 循环平稳 瞬时自相关 低信噪比

中图法分类号 TN911; **文献标志码** A

当前, 随着无线电技术和应用的迅猛发展, 无线电传输频段日益匮乏, 再加上大量有意或无意的干扰信号, 在同一信道的观测数据中出现两个或更多信号的情形日益普遍^[1]。由于观测数据中混有多个信号, 因而已有的单信号调制识别算法大多不能直接用于单信道时频重叠信号的调制识别; 而由于相移键控信号传输效率高、抗噪性能强的特点^[2], 因而在目前的地面通信和雷达中得到广泛使用。因此, 研究单信道时频重叠 MPSK 信号调制识别具有重要的意义和需求。

目前的双信号调制识别技术主要是基于信号在空域、特征域或其他域内的可分性来进行分类识别的, 主要分为两类: 一是基于信号分离的识别方法^[3, 4], 主要应用盲源分离的思想, 其实质是将多信号问题转化为单信号识别问题, 然而单通道信号需要充足的先验知识才能进行有效分离; 二是基于直接特征提取的方法, 其关键在于寻找信号明显可分的特征域, 当前使用的有功率谱特征^[5]、小波变换^[6]、循环平稳特征^[7]等。文献[8]提出的基于循环谱包络的方法在低信噪比下有较高的识别率, 但无法识别 8PSK 信号; 文献[9]提出的基于四阶循环累积量特征的方法要求已知载频和码速率, 较低信噪比时识别效果不佳, BPSK-QPSK、QPSK-QPSK 信号的识别率不高。

基于此, 本文通过提取信号瞬时自相关特征和循环谱特征, 对 6 种双 MPSK 信号组合 (BPSK-BPSK; BPSK-QPSK; BPSK-8PSK; QPSK-QPSK; QPSK-8PSK; 8PSK-8PSK) 进行分类识别, 实现了较

低信噪比下的单信道时频重叠 MPSK 信号的调制识别。

1 信号模型

假设两个独立传输的相移键控信号, 其信号集为 {BPSK, QPSK, 8PSK}, 载频相同, 码速率不相同, 则通过理想高斯白噪声信道后, 接收信号模型为

$$y(t) = r(t) + n(t) = s_1(t) + s_2(t) + n(t) \quad (1)$$

式(1)中, $n(t)$ 是均值为 0、方差为 σ_n^2 的高斯噪声, 且与发送信号独立; $s_i(t)$ 为发送的 MPSK 调制信号, 其复数学模型为

$$s_i(t) = \exp[j2\pi f_c t + j\varphi_i + j\varphi_0] \quad (2)$$

式(2)中, φ_i 为调制相位, 根据信源符号取值; φ_0 为初始相位。

2 联合特征分析

2.1 信号的瞬时自相关

信号的瞬时自相关^[10] 定义为信号的同相分量与正交分量的乘积, 即

$$ST(t) = s_1(t) \cdot s_Q(t) \quad (3)$$

由 Hilbert 变换的性质可知, 同相分量与正交分量的相位相差 90° , 即可以视为四分之一周期的延时, 而任意不同时刻的高斯白噪声不相关, 因而可以降低噪声的影响。

当信号为 MPSK 时

$$\begin{aligned} ST(t) &= \text{real}[s_1(t) + s_2(t)] \cdot \text{imag}[s_1(t) + s_2(t)] = \\ &= [\cos(2\pi f_c t + \varphi_{11} + \varphi_{10}) + \cos(2\pi f_c t + \varphi_{21} + \varphi_{20})] \cdot \\ &= [\sin(2\pi f_c t + \varphi_{11} + \varphi_{10}) + \sin(2\pi f_c t + \varphi_{21} + \varphi_{20})] = \\ &= \frac{1}{2} \sin(4\pi f_c t + 2\varphi_{11} + 2\varphi_{10}) + \end{aligned}$$

2015 年 11 月 6 日收到
第一作者简介: 曾创展。E-mail: google@126.com

$$\frac{1}{2} \sin(4\pi f_c t + 2\varphi_{2t} + 2\varphi_{20}) + \sin(4\pi f_c t + \varphi_{1t} + \varphi_{2t} + \varphi_{10} + \varphi_{20}) \quad (4)$$

则当信号为 BPSK-BPSK 时,

$$ST(t) = \sin(4\pi f_c t) + \sin(4\pi f_c t + \varphi_{3t}) \quad (5)$$

式中, φ_{3t} 取值 $\{0, \pi\}$ 。

信号为 BPSK-QPSK 时,

$$ST(t) = \frac{1}{2} [\sin(4\pi f_c t) + \sin(4\pi f_c t + 2\varphi_{2t}) + 2\sin(4\pi f_c t + \varphi_{4t})] \quad (6)$$

式(6)中, $\varphi_{2t}, \varphi_{4t}$ 取值 $\{0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}\}$ 。

信号为 BPSK-8PSK 时,

$$ST(t) = \frac{1}{2} [\sin(4\pi f_c t) + \sin(4\pi f_c t + 2\varphi_{2t}) + 2\sin(4\pi f_c t + \varphi_{5t})] \quad (7)$$

式(7)中, $\varphi_{2t}, \varphi_{5t}$ 取值 $\{0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4}, \pi, \frac{5\pi}{4}, \frac{3\pi}{2}, \frac{7\pi}{4}\}$ 。

信号为 QPSK-QPSK 时,

$$ST(t) = \frac{1}{2} [\sin(4\pi f_c t + 2\varphi_{1t}) + \sin(4\pi f_c t + 2\varphi_{2t}) + 2\sin(4\pi f_c t + \varphi_{4t})] \quad (8)$$

式(8)中, $\varphi_{1t}, \varphi_{2t}, \varphi_{4t}$ 取值 $\{0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}\}$ 。

信号为 QPSK-8PSK 时,

$$ST(t) = \frac{1}{2} [\sin(4\pi f_c t + 2\varphi_{1t}) + \sin(4\pi f_c t + 2\varphi_{2t}) + 2\sin(4\pi f_c t + \varphi_{5t})] \quad (9)$$

式(9)中, φ_{1t} 取值 $\{0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}\}$, $\varphi_{2t}, \varphi_{5t}$ 取值 $\{0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4}, \pi, \frac{5\pi}{4}, \frac{3\pi}{2}, \frac{7\pi}{4}\}$ 。

信号为 8PSK-8PSK 时,

$$ST(t) = \frac{1}{2} [\sin(4\pi f_c t + 2\varphi_{1t}) + \sin(4\pi f_c t + 2\varphi_{2t}) + 2\sin(4\pi f_c t + \varphi_{5t})] \quad (10)$$

式(10)中, $\varphi_{1t}, \varphi_{2t}, \varphi_{5t}$ 取值 $\{0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4}, \pi, \frac{5\pi}{4}, \frac{3\pi}{2}, \frac{7\pi}{4}\}$ 。

2.2 循环谱特征

本文采取文献[11]中提出的基于信号非线性(4次方)变换后的谱相关函数特征参数提取算法,并加以改进以适应低信噪比条件。

MPSK 信号非线性变换后的谱相关函数推导可以参考文献[11],在此不再赘述。比较 BPSK, QPSK, 8PSK 信号 4 次方变换后的谱相关函数表达式可见三者有明显的区别。选择归一化四相特征参

数 $\eta^{4f_c}(2f_c)$, 定义如下

$$\eta^{4f_c}(2f_c) = \left| \frac{S^{4f_c}(2f_c)}{S^0(0)} \right| \quad (11)$$

则当信号为 BPSK 时, $S_{\text{BPSK4}}^0(0) = \frac{9}{64} \delta(0)$,

$S_{\text{BPSK4}}^{4f_c}(2f_c) = \frac{3}{128} \delta(0)$, 因而

$$\eta^{4f_c}(2f_c) |_{\text{BPSK4}} = \left| \frac{S^{4f_c}(2f_c)}{S^0(0)} \right| = 0.1667 \quad (12)$$

当信号为 QPSK 时,

$$\eta^{4f_c}(2f_c) |_{\text{QPSK4}} = \left| \frac{\frac{3\delta(0)}{128}}{\frac{9\delta(0)}{64}} \right| = 0.1667 \quad (13)$$

当信号为 8PSK 时,

$$\eta^{4f_c}(2f_c) |_{\text{8PSK4}} = \left| \frac{0}{\frac{9\delta(0)}{64}} \right| = 0 \quad (14)$$

但由于对信号进行 4 次方处理会增大噪声的影响, 因而引入抗噪性能较好的瞬时自相关, 使用 $\{\text{real}[s(t)] \cdot \text{imag}[s(t)]\}^2$ 来替代 $[s(t)]^4$ 。

3 调制方式的识别

3.1 特征参数

3.1.1 瞬时自相关谱峰幅度 M

$$M = \max \{2 \cdot \text{fft}[ST(t)] / \text{length}[ST(t)]\} \quad (15)$$

该特征参数是计算信号瞬时自相关的频谱谱峰幅度来划分不同信号类别的, 因为由上面的分析可以知道, BPSK-BPSK 的谱峰幅度为 1, BPSK-QPSK、BPSK-8PSK 的谱峰幅度为 0.5, 其余三类组合信号的谱峰幅度均小于 0.5。

3.1.2 非线性变换后谱相关函数特征 D

$$D = \eta^{4f_c}(2f_c) = \left| \frac{S^{4f_c}(2f_c)}{S^0(0)} \right| \quad (16)$$

该特征参数是计算信号的高阶累积量来判断信号是否含有 QPSK 或 8PSK 的, 由理论分析可以知道 $D_{\text{QPSK}} > 0, D_{\text{8PSK}} = 0$, 因而当含有 8PSK 信号时, D 值会相对减少。

3.2 判决阈值的确定

对各个参数随信噪比的变化进行仿真, 确定噪声对其识别能力的影响, 选定特征参数的最佳阈值如下。

3.2.1 瞬时自相关谱峰幅度 M 阈值 th_1, th_2

参数 M 可以用于区分 BPSK-BPSK、 $\{\text{BPSK-QPSK}, \text{BPSK-8PSK}\}$ 和 $\{\text{QPSK-QPSK}, \text{QPSK-8PSK}, \text{8PSK-8PSK}\}$, 由之前分析可以得知 M 的理论值为 $M_{\text{BPSK-BPSK}} = 1, M_{\{\text{BPSK-QPSK}, \text{BPSK-8PSK}\}} = 0.5$ 。加入噪声和多径后, 由图 1 可知, 此时用于区分 BPSK-BPSK 的

阈值为 $th_1 = 0.75$, 区分 {BPSK-QPSK, BPSK-8PSK} 的阈值为 $th_2 = 0.3$, 与理论分析相符。

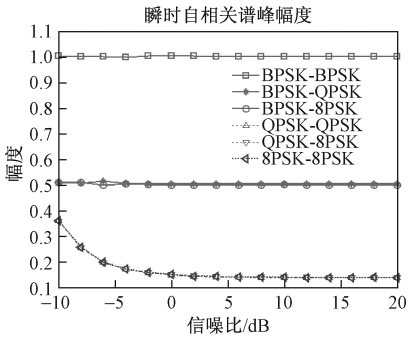


图1 特征参数 M
Fig. 1 Parameter M

3.2.2 非线性变换后谱相关函数特征 D 阈值 d_1 、 d_2 、 d_3

参数 D 可以用于 {BPSK-QPSK、BPSK-8PSK} 和 {QPSK-QPSK, QPSK-8PSK, 8PSK-8PSK} 之间的分类。由图 2 可知,此时用于区分 BPSK-QPSK 和 BPSK-8PSK 的阈值为 $d_1 = 0.12$, 区分 QPSK-QPSK 和 {QPSK-8PSK, 8PSK-8PSK} 的阈值为 $d_2 = 0.1$, 区分 QPSK-8PSK 和 8PSK-8PSK 的阈值为 $d_3 = 0.056$ 。

3.3 识别算法

根据上面特征参数的不同,采用决策树^[12]的识别分类方法,识别流程如图 3 所示。采用的识别步骤如下。

(1) 计算信号的瞬时自相关 $ST(t)$, 计算其谱峰

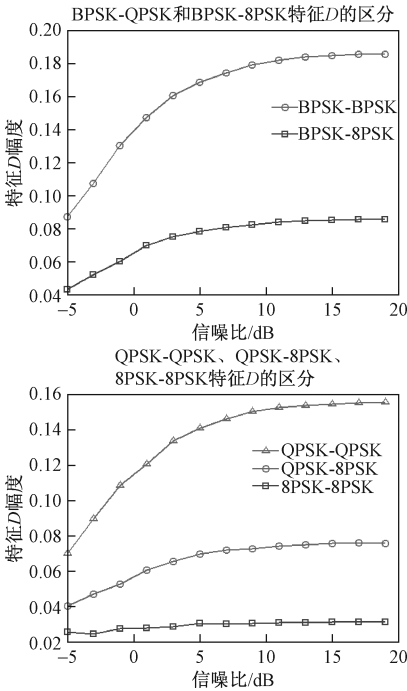


图2 特征参数 D
Fig. 2 Parameter D

幅度 M , 将待识别信号分成 3 类: BPSK-BPSK、(BPSK-QPSK, BPSK-8PSK) 和 (QPSK-QPSK, QPSK-8PSK, 8PSK-8PSK)。

(2) 对于判别类属于 (BPSK-QPSK, BPSK-8PSK) 的信号, 计算其非线性变换后谱相关函数特征 D , 将待识别信号分成 2 类: BPSK-QPSK 和 BPSK-8PSK。

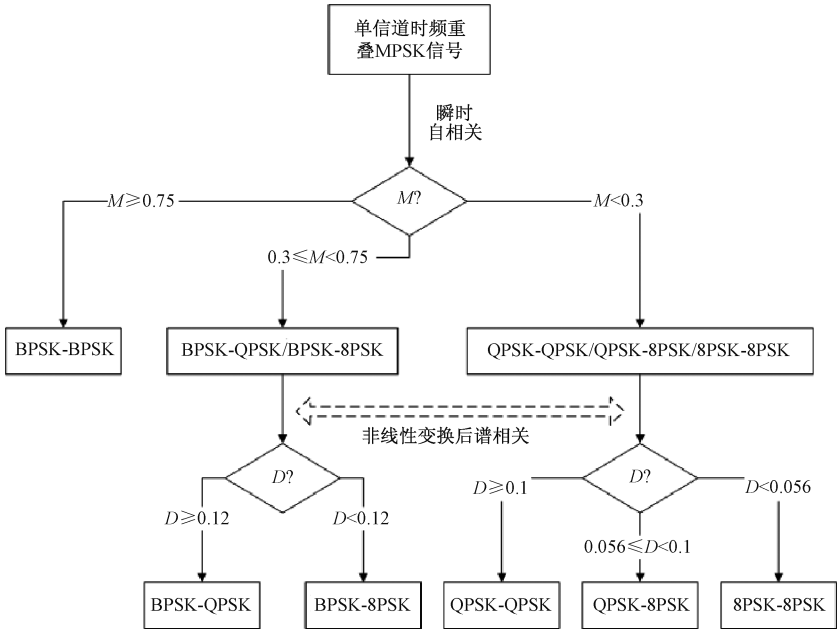


图3 信号识别算法流程图
Fig. 3 Flow chart of the recognition algorithm

表 1 不同方法的识别类型和识别效果

Table 1 The recognizable types and recognition effect of different methods

算法	可识别类型	各信噪比下平均识别率/%		
		0 dB	5 dB	10 dB
基于循环谱包络 ^[8]	BPSK-BPSK; BPSK-QPSK; QPSK-QPSK;	97	99	99
本文基于联合特征参数的算法	BPSK-BPSK; BPSK-QPSK; QPSK-QPSK;	90	97	98
	BPSK-BPSK; BPSK-QPSK; BPSK-8PSK; QPSK-QPSK;	77	93	94
	QPSK-8PSK; 8PSK-8PSK			
基于高阶循环累积量 ^[9]	BPSK-BPSK; BPSK-QPSK; BPSK-8PSK; QPSK-QPSK;	54	72	86
	QPSK-8PSK; 8PSK-8PSK			

(3) 对于判别类属于 (QPSK-QPSK, QPSK-8PSK, 8PSK-8PSK) 的信号,由特征 D 可将其分为 3 类:QPSK-QPSK、QPSK-8PSK 和 8PSK-8PSK。

4 仿真分析

为了测试算法性能,用 Matalab 仿真试验对该方法进行验证。调制信号的调制载频为 100 Hz,采样频率为 2 000 Hz。基带信号为随机产生的 0、1 序列,信源长度为 256 个码元,噪声为理想高斯白噪声。时频重叠双 MPSK 信号的码速率分别为 50 Baud 和 100 Baud,功率比为 1:1。

在不同信噪比下对每类组合信号进行 100 × 100 次试验,信噪比从 -10 dB 到 20 dB (2 dB 步进)。实验结果如图 4 所示。

实验表明,对于这六类仿真信号,当 $SNR > 6$ dB 时,整体识别正确率大于 90%。

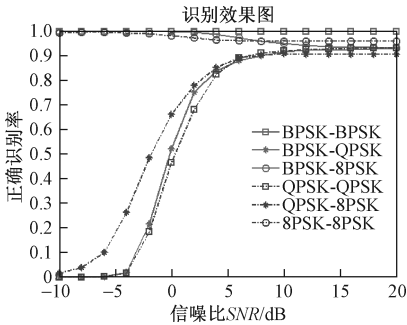


图 4 信号综合识别效果

Fig. 4 The average recognition effect of signals

与已有算法相比,表 1 给出了各自的识别类型和平均识别效果,从对比结果看,相对于循环谱包络的算法,本文的识别率与其相近,但可识别的调制类型更多,而与同样可识别类型多的高阶循环累积量法相比,其整体识别效果更好。

5 结束语

根据时频重叠信号在循环频率上的可分性,结合信号的瞬时自相关特性,构造了信号经非线性变换后的相关谱特征参数 D 和基于瞬时自相关特性

的特征参数 M ,实现了单信道时频重叠 MPSK 信号的调制识别,与基于循环谱包络、高阶循环累积量的识别方法相比,不仅识别类型有所增加,且低信噪比下的综合识别正确率也有所提高,因而可以证明本文提出的基于联合特征参数的调制识别方法有效。

参 考 文 献

1 曾创展,贾鑫,朱卫纲. 通信信号调制方式识别方法综述. 通信技术, 2015;48(3):252—257

Zeng C Z, Jia X, Zhu W G. Modulation Classification of communication signals. Communications Technology, 2015;48(3):252—257

2 樊昌信,曹丽娜. 通信原理(第6版). 北京:国防工业出版社, 2006: 212—213

Fan C X, Cao L N. Principle of communication (6th edition). Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 212—213

3 Swami A, Sadler B M. Hierarchical digital modulation classification using cumulants. 2000;48(3):416—429

4 Zhou Z, Chen H, Liu N. Automatic recognition of multiple interferences and signals in the same channel based on ICA. the IET International Radar Conference 2009. Guilin: IET, 2009: 1—4

5 Nagy J P A. Modulation classifier for multi channel systems and multi transmitter situations. Military Communications Conference, 1994 (MILCOM '94). Fort Monmouth, NJ: IEEE, 1994: 816—820

6 朱波. 基于小波的单信道时频重叠信号参数分析与实现研究. 成都:电子科技大学,2010

Zhu B. Study on parameter analysis and implementation of single-channel time-frequency overlapped signals based on wavelet. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010

7 Yu N Y, Ma H G, Shi R. Modulation recognition of co-channel OQPSK and MSK based on cyclostationarity. the 2nd International Conference on Information Management and Engineering (ICIME2010). Chengdu: IEEE, 2010: 284—287

8 余志斌,于宇宇. 基于循环谱包络的多信号调制识别. 计算机应用, 2012;32(8):2119—2122

Yu Z B, Yu N Y. Modulation recognition for multi-component PSK signals based on cyclic spectrum amplitude. Journal of Computer Applications, 2012;32(8):2119—2122

9 李旷代,郭黎利,石荣,等. 单信道时频重叠 MPSK 信号的调制识别方法. 火力与指挥控制, 2010;35(2):150—153

Li K D, Guo L L, Shi R, et al. Modulation recognition method for single-channel time-frequency overlapped MPSK signals. Fire Control & Command Control, 2010;35(2):150—153

10 Min Z, Quanyuan F. A new feature Parameter for MFSK/MPSK rec-

- ognition. the 2011 International Conference on Intelligence Science and Information Engineering (ISIE). Wuhan: IEEE, 2011:21—23
- 11 张 炜. 数字通信信号调制方式自动识别研究. 长沙:国防科学技术大学, 2006
- Zhang W. Automatic modulation recognition of digital communication signals. Changsha: National University of Defense Technology, 2006
- 12 徐毅琼. 数字通信信号自动调制识别技术研究. 郑州:解放军信息工程大学, 2011
- Xu Y Q. Research on automatic modulation recognition of digital communication signals. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2011

A Modulation Recognition Method for Time-frequency Overlapped MPSK Signals in the Single Channel

ZENG Chuang-zhan¹, JIA Xin²

(Department of Graduate Management¹, Department of Optical and Electronic Equipment², Equipment Academy, Beijing 101416, P. R. China)

[**Abstract**] To solve the problems in modulation recognition of two time-frequency overlapped MPSK signals in the single channel, a method based on combined feature parameters is put forward. According to the distinctiveness of the time-frequency overlapped signals in the cyclic frequency and the signals' instantaneous correlation, it takes advantage of two parameters to classify and recognize the arbitrary combinations of two MPSK modulation signals. The simulation results show that, in the case that SNR is above 6 dB, the signal combinations can be recognized correctly with the average rate of close to 90%.

[**Key words**] modulation recognition time-frequency overlap in the single channel cyclostationary instantaneous correlation low SNR

(上接第 167 页)

- 7 吕 锋, 徐宇白. 偶极子 RFID 标签天线的优化设计与研究. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2009;31(3):351—353, 357
- Lü Feng, Xu Yubai. Design and development of dipole antennas for passive RFID tags. Journal of Wuhan University of Technology (Engineering Information and Management), 2009;31(3):351—353, 357
- 8 陈丹凤, 官伯然. 半波振子天线宽带阻抗匹配设计中的加载法. 杭州电子科技大学学报, 2008;28(1):28—31
- Chen Danfeng, Guan Boran. The loading radome method of designing broadband impedance matching of the half-wave dipole antenna. Journal of Hangzhou Dianzi University, 2008;28(1):28—31

Design of the High Performance 2.45 GHz Half-wave Dipole Antenna

YIN Hong-yan, LIU Yu-jun, LIU Yang, XU Zhen-zhen

(Technical Center for Inspection & Quarantine of Beijing Entry-exit Inspection and Quarantine Authority, Beijing 100026, P. R. China)

[**Abstract**] The dipole antenna is the basic for antenna study, its simple structure, good impedance performance and widely usage. A high performance 2.45 GHz half-wave dipole antenna is designed with good structures based on the deep study of dipole antenna. The production of such antenna is manufactured and verified by testing. The test results show that the antenna has good impedance matching performance and stable and reliable performance. This production has been used in a national public service projects, ed Study of Key Technologies in Electromagnetic Radiation Safety Evaluation of Electronic Products, which meets with the acceptance check requirements.

[**Key words**] dipole antenna half-wave antenna impedance characteristic