

混合调制信号调制识别方法^{*}

杨发权¹, 李 赞², 罗中良³

- (1. 佛山科学技术学院 电子与信息工程学院, 广东 佛山 528000;
2. 西安电子科技大学 综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071;
3. 惠州学院计算机科学系, 广东 惠州 516007)

摘 要: 研究基于决策理论算法的混合调制信号特征参数提取与自动识别技术, 提出适合混合调制信号调制识别的树型分类器及相应识别步骤。在外调制、内调制识别时首次分别采用副载波信号个数构成的特征矢量、均值归一化包络方差、副载波信号瞬时幅度分布区域统计值等算法, 抑制噪声干扰, 提高特征参数的准确性, 仿真结果表明, 在信噪比为 6 dB 情况下, 调制识别率接近 90%, 和现有混合调制识别方法相比取得较好的识别效果, 在混合信号调制识别管理中具有广泛的应用前景。

关键词: 树型分类器算法; 混合调制信号; 均值归一化包络方差; 调制识别

中图分类号: TN 911 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579 (2014) 01-0042-05

Method of Modulation Recognition of Mixed Modulation Signal

YANG Faquan¹, LI Zan², LUO Zhongliang³

- (1. School of Electronics and Information Engineering, Foshan University, Foshan 528000, China;
2. State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China;
3. Department of Computer Science, Huizhou University, Huizhou 516007, China)

Abstract: Based on decision theory algorithm, the characteristic parameter extraction and automatic identification technology of mixed modulation signal are researched, and then the tree classifier with identification steps which are suitable for mixed modulation signal modulation recognition are put forward. The characteristic vector which are composition of the number of subcarrier signal, envelope variance of mean normalization and algorithm of the statistical value of subcarrier signal instantaneous amplitude distribution area are first used in recognition of outer modulation and inner modulation respectively so as to reduce the noise interference and improve the accuracy of characteristic parameters. The simulation results show that modulation recognition rate is close to 90% under the condition of SNR which is 6 dB and it has a good recognition effect compared with mixed modulation recognition method existing and a broad prospect of application in the management of the mixed signal modulation identification.

Key words: tree classifier algorithm; mixed modulation signal; envelope variance of mean normalization; modulation recognition

调制方式识别广泛应用于军用和民用通信, 如信号监控、信号确认、干扰辨识、电子对抗、电子

救援及军事威胁分析等, 是软件无线电、认知无线电、频谱感知等领域研究的基础。随着无线电通信

* 收稿日期: 2013-07-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61072070, 61301179); 教育部博士学科点基金资助项目 (20110203110011); ISN 国家重点实验室自主课题资助项目 (ISN1101002); 广东省科技计划资助项目 (2012B010100038); 广东省-教育部产学研结合资助项目 (2012B091100364); 惠州市科技计划资助项目 (2011C020005005)

作者简介: 杨发权 (1965 年生), 男; 研究方向: 无线通信信号的检测与识别技术; E-mail: yafaquan.fosu@163.com

技术的迅速发展, 信号环境日益复杂, 新的调制方式不断出现, 影响识别效率的因素越来越多, 如何在现有自动识别技术方法基础上不断创新、提高仍然是一项颇具挑战性的研究课题^[1-2]。针对目前在国内外许多领域还在使用的模拟通信系统如: 民用 AM、FM 广播系统; 飞机导航系统; 出租车公司、公交公司、海上渔船、海上搜救、小区物业管理、单位保安以及公安警务等使用的监控和对讲系统等, 所有这些模拟通信系统不可能马上更换, 只有通过技术改造与升级的办法, 如先对数字信息进行数字调制, 然后用调制后的信号再对原模拟系统的载波进行模拟调制, 这样, 经过两次调制的通信系统就变成模拟、数字混合通信系统。如目前在外国军用与民用通信中已广泛使用的副载波通信系统^[3], 副载波广播系统, 车辆自动定位系统等^[4]。由于这些混合调制信号, 可以看作为多载波信号, 是通过模拟系统来发射的, 具有一定的隐蔽性, 不容易与其它信号分开, 同时该频段信号密集, 电磁背景复杂, 相互干扰情况较严重, 这些都给电磁频谱监测识别带来很大的挑战。而目前对于这种多载波混合调制信号的调制识别研究相对较少, 在文献^[5]中提出新的混合调制的方案, 利用一些改进的混合调制方式获得较高的带宽效率、功率谱特性和较低的误码率, 进一步提高了频带利用率; 文献^[6-8]分别对含有混合调制的卫星链路测控信号的频谱特征进行了初步的分析与仿真, 并且采用常规方法先识别外层调制, 再经过信号解调、分路后对内层调制信号进行处理, 实现对混合调制信号的分类识别, 但识别效果尚需提高。本文在分析混合调制信号的瞬时幅度、瞬时频率、副载波个数特征值及特征矢量、均值归一化包络方差、副载波信号瞬时幅度分布区域统计值、信号调制阶数直方图波峰个数等特征值参数基础上, 采用树形分类器算法实现对混合调制信号的调制识别^[9-10], 并且识别效果较好。

1 混合调制信号识别特征值

1.1 混合调制信号的瞬时幅度、瞬时频率

混合调制信号包括内调制和外调制两部分, 内调制是指基带信号通过常规的数字调制包括 ASK、FSK、PSK、DPSK 等, 所用的载波称副载波; 外调制是指用副载波调制后的信号再对原来模拟系统中的载波称主载波或公共载波进行的第二次调制, 设数字信号经副载波调制后的已调信号为 $u(t)$, 调

制度为 k , 则发射的混合 AM 调制信号可表示为

$$S_{AMh}(t) = [1 + ku(t)] \cos \omega_0 t \quad (1)$$

若接收信号为 $r(t)$, 噪声为 $n(t) = N(t) \cos \omega_0(t)$, 则接收信号为

$$r(t) = A(t) \cos[\omega_0 t + \theta(t)] + N(t) \cos \omega_0(t)$$

经 Hilbert 变换得:

$$\hat{r}(t) = A(t) \sin[\omega_0 t + \theta(t)] + N(t) \sin \omega_0 t$$

令 $\theta(t) = 0$, 则接收的混合 AM 调制信号瞬时幅度为

$$a_{AMh}(t) = \sqrt{\hat{r}^2(t) + r^2(t)} = A(t) + N(t)$$

比较 (1) 式知:

$$a_{AMh}(t) = 1 + ku(t) + N(t) \quad (2)$$

同理对于混合 FM 调制信号可表示为

$$S_{FMh}(t) = A_c \cos[\omega_0 t + k_f \int u(t) dt]$$

在接收端混合 FM 调制信号瞬时频率为

$$f_h(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} =$$

$$\frac{1}{2\pi} \frac{d[\tan^{-1} \frac{\hat{r}(t)}{r(t)}]}{dt} \approx f_0 + \frac{1}{2\pi} k_f u(t) \quad (3)$$

1.2 副载波信号个数 Z_a 、 Z_f 及特征矢量 Z_{af}

混合 AM、FM 调制信号, 分别通过计算瞬时幅度和瞬时频率可得到副载波信号, 由 (2) 式和 (3) 式得到副载波和噪声的混合信号, 通过 FFT 变换可得到对应的功率谱, 以 AM-2FSK 混合调制为例其瞬时值功率谱与常规 AM、2FSK 瞬时值功率谱比较如图 1 所示。

从图 1 知, 混合调制信号其功率谱包含明显的副载波信号包络, 而非混合调制信号的功率谱则无明显的副载波信号包络, 根据这一特征可同时提取副载波信号个数 Z_a 、 Z_f , 并构成特征矢量 $Z_{af} = [Z_a, Z_f]$, 只有当 $N_{af} = [0, 0]$ 时, 识别信号为非混合调制信号, 否则识别为混合调制信号。

在上述特征矢量提取算法中, 副载波信号个数参量提取算法十分关键, 主要经过以下步骤^[11-12]:

1) 由信号瞬时频率或瞬时幅度计算功率谱 $P(n\Delta f)$ 。

2) 确定门限值

$$\alpha = \frac{1}{[\lambda M]} \sum_{i=0}^{[\lambda M]} P(i\Delta f) \quad 0 < \lambda < \frac{1}{4} \quad (4)$$

其中符号 $[\]$ 表示向下取整。

3) 统计连续大于门限值的点数并记录相应的起点 H 、终点 L 和连续的段数 r

$$N_L^H(r) = \text{Stat}\{P(n\Delta f) > \alpha\} \quad (5)$$

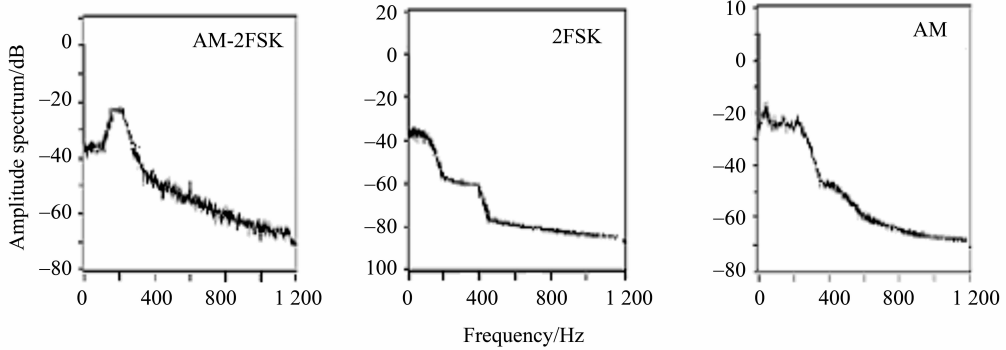


图 1 AM-2FSK 混合调制与常规 AM、2FSK 调制的瞬时值功率谱

Fig. 1 Instantaneous power spectrum of AM-2FSK hybrid modulation and conventional AM, 2FSK

Stat 表示在某条件下对序列进行统计。

4) 估计各段带宽值

$$\hat{\alpha}_r = \Delta f \cdot N_L^H(r) \quad (6)$$

5) 计算 $\hat{\alpha}_r$ 中大于设定阈值的个数 n_1 , 即为副载波个数参量。

1.3 均值归一化包络方差

若 μ 、 σ^2 分别为信号包络的均值和方差, 定义均值归一化包络方差:

$$C = \sigma^2 / \mu^2 \quad (7)$$

该参数反映信号包络变化程度, 对于包络恒定与非恒定的混合调制信号有较好的分类效果, 对于外层调制分别为 AM、FM 的混合调制, 由调制原理知, 混合的 AM 信号其幅度随调制信号变化, 而混合 FM 信号的频率随调制信号变化, 计算结果表明, 混合 AM 调制其 C 值在相同信噪比情况下远大于混合 FM 调制, 如表 1 所示。

表 1 外调制分别为 AM、FM 的混合调制在不同信噪比时 C 仿真值表Table 1 C simulation value of hybrid modulation which external modulation contains AM, FM respectively in different SNR

C	5 dB	6 dB	7 dB	8 dB	9 dB	10 dB	11 dB	12 dB	13 dB	14 dB	15 dB
AM-4FSK	0.343	0.294	0.283	0.250	0.243	0.213	0.205	0.185	0.180	0.178	0.175
AM-MSK	0.318	0.285	0.283	0.241	0.239	0.225	0.193	0.182	0.175	0.173	0.172
AM-BPSK	0.293	0.251	0.242	0.235	0.190	0.185	0.183	0.178	0.179	0.166	0.162
AM-QPSK	0.285	0.265	0.250	0.240	0.230	0.190	0.180	0.175	0.160	0.150	0.148
FM-4FSK	0.155	0.164	0.106	0.081	0.088	0.053	0.06	0.042	0.035	0.028	0.025
FM-MSK	0.161	0.132	0.119	0.102	0.075	0.063	0.055	0.045	0.028	0.026	0.021
FM-BPSK	0.148	0.135	0.120	0.108	0.063	0.051	0.052	0.042	0.031	0.026	0.021
FM-QPSK	0.181	0.130	0.122	0.080	0.061	0.073	0.060	0.053	0.032	0.026	0.020

根据表 1, 适当选择 C 的阈值大小可实现混合 AM 调制与混合 FM 调制类间信号的调制识别, 即外调制识别。

1.4 副载波信号瞬时幅度分布区域统计值

对于混合调制信号, 要提取副载波信号的瞬时幅度值, 需经过两次瞬时幅度值提取过程。第一次提取得到副载波与噪声混合的信号, 对该信号进行一次滤波后再进行第二次瞬时幅度值提取便可得到反映副载波信号调制信息的基带与噪声的混合信号, 而副载波信号瞬时幅度分布区域统计值就是对第二次提取的瞬时幅度的统计值。因而定义副载波信号瞬时幅度分布区域统计值

$$Q = \frac{M \{a(t) \leq 0.3b\}}{M},$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{M\lambda} \text{sort}\{a(t)\}}{M\lambda}, \quad \lambda \in (0, 1) \quad (8)$$

其中 $\text{sort}\{a(t)\}$ 表示对瞬时幅度序列 $a(t)$ 的升序排列, 而 $\text{sort}\{a(t)\}$ 表示 $a(t)$ 的降序排列

$M \{a(t) \leq 0.3b\}$ 表示信号包络区域范围 0.3 内样点数^[13]。以 AM 混合调制为例, 内调制分别为 2FSK、4FSK、BPSK、QPSK 时, 副载波信号瞬时幅度分布区域统计值 Q 在不同信噪比情况下的计算值如表 2 所示。

表 2 内调制分别为 MPSK、MFSK 的混合调制在不同信噪比时 Q 仿真值表

Table 2 Q simulation value of hybrid modulation which internal modulation contains MPSK, MFSK respectively in different SNR

Q	5 dB	6 dB	7 dB	8 dB	9 dB	10 dB	11 dB	12 dB	13 dB	14 dB	15 dB
AM-BPSK	0.151	0.132	0.128	0.127	0.126	0.126	0.125	0.125	0.125	0.126	0.125
AM-QPSK	0.105	0.091	0.085	0.081	0.078	0.075	0.070	0.068	0.065	0.064	0.063
AM-4FSK	0.065	0.043	0.038	0.02	0.012	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
AM-2FSK	0.035	0.025	0.012	0.011	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

由表 2 知，内调制为 MPSK 时 Q 值明显大于内调制为 MFSK 时的 Q 值，合理选择 Q 阈值的大小，可将内调制为 FSM 类混合调制信号与 PSM 类混合调制信号分开。

1.5 混合信号直方图波峰个数 N

对于 FSK 信号，直方图波峰个数 N 的取值大小反映 FSK 信号调制阶数，以混合调制 FM-2FSK、FM-4FSK 信号为例，提取副载波信号瞬时频率，对提取的瞬时频率进行直方图统计，统计分段数为 100，仿真结果如图 2 所示。

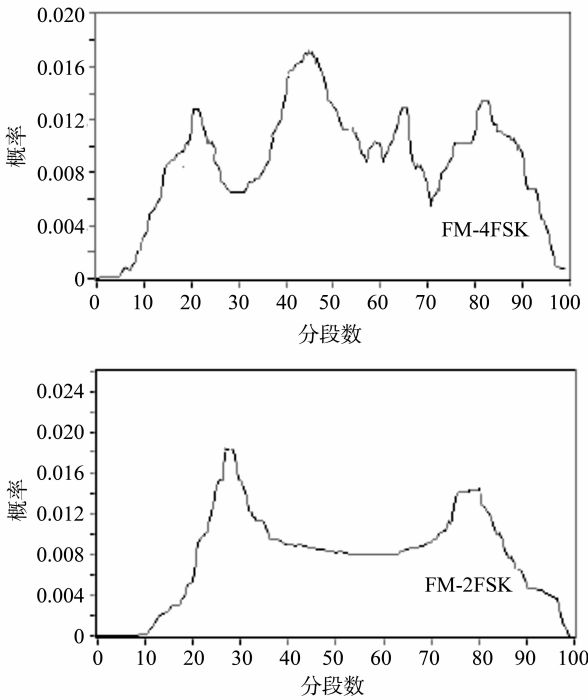


图 2 混合调制 FM-4FSK、FM-2FSK 信号副载波瞬时频率直方统计图

Fig. 2 Histogram of subcarrier instantaneous frequency of hybrid modulation FM-MFSK, FM-2FSK

从图 2 看出，统计直方图中波峰的个数对应着相应 FSK 信号的调制阶数，通过检测直方图中波峰数可估计 FSK 信号的调制阶数，从而实现混合 FM-MFSK 以及 AM-MFSK 信号类内的区分。同理，对于类内信号为 MPSK 信号的区分，则需要对提取

的瞬时相位进行直方图统计，直方图中波峰个数 N 反映 PSK 信号相位的调制阶数，这样根据 N 的取值大小可实现对类内信号为 MPSK 信号的区分^[14-15]。

2 混合调制信号调制分类识别算法

根据以上各种特征参数，采用树形判决器结构的混合调制识别分类器实现对 AM-2FSK、AM-4FSK、AM-QPSK、AM-BPSK、FM-2FSK、FM-4FSK、FM-BPSK、FM-QPSK 分类识别算法流程如图 3 所示。

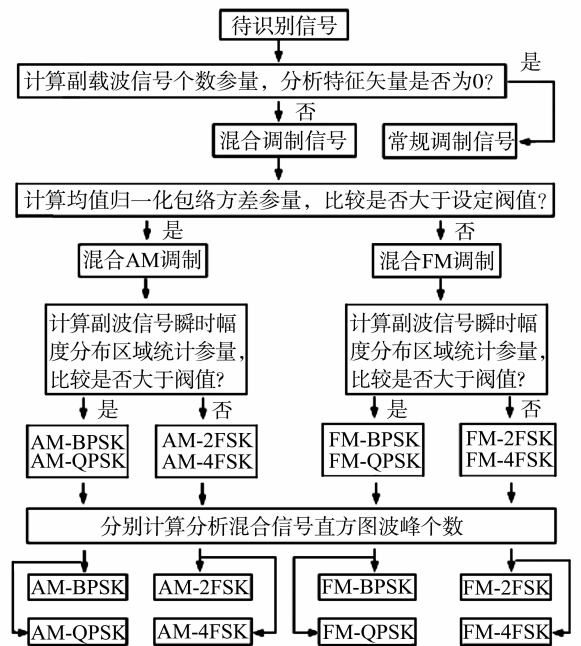


图 3 混合调制信号调制分类识别算法流程图

Fig. 3 Flow chart of modulation classification recognition algorithm of hybrid modulation signal

在树形判决器结构的分类器中，用于混合调制信号与常规调制信号、混合 AM 调制与混合 FM 调制、内调制为 MPSK 与 MFSK 等调制以及 MPSK 或 MFSK 类内的调制的识别的特征参数门限值的选取对识别的正确率影响很大，因此这几个特征门限的选择是识别的关键一环。实验方法如下：对于每一种特征参数，将可以用此特征参数加以区分的调制

信号作为实验信号。对于每一种实验信号, 计算在某一信噪比时参数取值的分布情况并以其均值作为该信号在该信噪比时的典型值, 然后改变信噪比取值, 再进行如上的实验, 最后, 通过绘制曲线来选取该参数的门限值。

3 混合调制识别仿真结果及其性能分析

根据上述分类算法, 用 MATLAB 做仿真实验, 对 AM-2FSK、AM-4FSK、AM-QPSK、AM-BPSK、FM-2FSK、FM-4FSK、FM-BPSK、FM-QPSK 等八种混合调制信号进行调制识别。仿真参数及条件为: 仿真信号主载波频率为 15 000 Hz, 副载波频率 1 500 Hz, 码元速率为 1 200 Baud, FSK 调制指数为 0.35, FM 频偏为 1 000 Hz, AM 调制度为 0.8, 环境为理想加性高斯白噪声信道, 信噪比从 3 dB 到 13 dB 变化, 每信噪比下独立仿真 200 次。仿真结果如下图 4 所示。

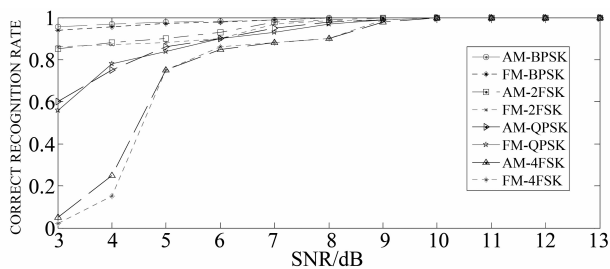


图 4 混合调制信号调制识别仿真图

Fig. 4 Simulation chart of modulation recognition of hybrid modulating signal

仿真结果表明, 当信噪比大于 6 dB 时, 分类器对各混合调制信号识别率接近 90% 以上, 并随信噪比的增加, 识别率逐步提高, 当信噪比达到 9 dB 以上, 识别率可达 100%, 当信噪比较小时, 对于 AM-BPSK、FM-2FSK、FM-BPSK、FM-BPSK 等混合调制, 分类器仍然比较高。

4 结论

文中通过提取混合调制信号的瞬时幅度、瞬时频率、副载波信号个数构成的特征矢量实现对混合调制信号与常规调制信号识别; 通过提取均值归一化包络方差实现对混合调制信号的外调制分类识别; 通过副载波信号瞬时幅度分布区域统计值的算法实现对内调制为 MFSK 与 MPSK 的分类识别; 通过提取信号直方图波峰个数可实现内调制为 MFSK 或 MPSK 的分类识别; 最终实现对各种混合调制信

号进行调制识别, 实验表明, 研究所采用的方法, 识别效果较好, 对包含混合调制信号的无线通信信号的环境管理, 有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] OCTAVA A, DOBRE A, YEHESEKEL B. Cyclostationarity Based Modulation Classification of Linear Digital Modulations in Flat Fading Channels [J]. *Wireless Personal Communications*, 2010, 54(4): 36–48.
- [2] GLAVAN C, HOLBAN S. A Model for Determining the Number of Negative Examples used in Training a MLP [J]. *Innovations in Computing Sciences and Software Engineering*, 2010, 55(2): 537–542.
- [3] AKE N, LU L. An FM subcarrier based air warning system [J]. *IEEE* 2008, 38(2): 875–880.
- [4] 胡科. 机动车辆定位系统的 FSK/FM 组合调制解调特性分析[J]. *电讯技术*, 2008, 3(3): 149–152.
- [5] QL C H, FENG M. Hybrid modulation for AM broadcasting [C]//The 3rd International Conference on Natural Computation, 2007, 2: 436–440.
- [6] 张新勋, 张兵. 一种调频调相混合调制信号及抗干扰性能分析[J]. *指挥控制与仿真*, 2007, 29(01): 63–66.
- [7] HUANG B, LIU H X. The employment of the combined modulation formats in the passive optical network [J]. *Optical Communication Technology*, 2008, 30(8): 1–4.
- [8] 刘洛琨, 和昆英. 一种带有二次调制信号的调制识别算法与仿真[J]. *计算机仿真*, 2008, 25(1): 74–76.
- [9] 杨发权, 李赞, 罗中良, 等. 基于决策理论算法的单载波多载波数字调制识别技术研究[J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2013, 52(1): 17–22.
- [10] JEFFERSON S, MENGCHOU Z. Real-time modulation classification based on maximum likelihood [J]. *IEEE Communications Letters*, 2008, 35(12): 132–140.
- [11] 张秀丽, 李海清. 基于谱域联合特征的信号调制类型识别[J]. *无线通信技术*, 2010, 35(5): 59–61.
- [12] 杨发权, 李赞, 罗中良, 等. 一种 N 维数据块正交调制及其解调方法的研究 [J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2012, 51(3): 18–22.
- [13] DENNIS M L, NANDI K. Semi-blind algorithms for automatic classification for digital modulation schemes [J]. *Digital Signal Processing*, 2008, 38(3): 209–227.
- [14] AVCI E, HANBAY D, VAROL A. An expert discrete wavelet adaptive network based fuzzy inference system for digital modulation recognition [J]. *Expert Systems with Applications*, 2007, 30(3): 582–589.
- [15] 艾玲梅, 郭春. 基于组合特征提取与多级 SVM 的轮胎花纹识别[J]. *计算机工程与应用*, 2012, 48(12): 14–17.