

基于循环谱包络的多信号调制识别

余志斌^{1*}, 于宁宇²

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 成都 610031; 2. 第二炮兵工程学院 101 教研室, 西安 710025)

(* 通信作者电子邮箱 zbinyu@126.com)

摘要:针对单通道接收机在多信号环境下难以处理信号调制识别的问题,提出一种不经信号分离直接提取各独立分量信号特征以有效识别多个相移键控(PSK)信号的新方法。该方法从理论上推导了时频重叠多分量信号在循环频率轴上的可分性,在此基础上提出了信号调制特征的提取方法和易于工程实现的信号识别方法。理论分析和仿真实验表明:该方法能不受干扰地提取各分量信号的调制特征,并能有效识别调制集内任意组合的双相移键控信号,当信噪比(SNR)为 0 dB 时,各信号组合的平均正确识别率能达到 97%。

关键词:信号处理;循环平稳;特征;相移键控;调制识别

中图分类号: TN911.6 **文献标志码:** A

Modulation recognition for multi-component PSK signals based on cyclic spectrum amplitude

YU Zhi-bin^{1*}, YU Ning-yu²

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China;

2. 101 Section, Second Artillery Engineering College, Xi'an Shaanxi 710025, China)

Abstract: Concerning the modulation recognition problem of the single-channel receiver working under the multi-signal environment, a new approach which can directly extract the feature of each independent component was proposed to identify multi-component Phase Shift Keying (PSK) signals. In this method, the spectral correlation function of the multi-component signal was deduced, features of signals were extracted and the classifier was designed. The theoretic analysis and experimental results show that the proposed algorithm can extract the feature of each independent component under the mutual interference of component signals, it can effectively classify arbitrary combinations of dual-signals in the given set, and the average correct recognition rate of all combinations reaches 97% when Signal-to-Noise Rate (SNR) is 0 dB.

Key words: signal processing; cyclostationary; feature; phase shift keying; modulation recognition

0 引言

在电子侦察中,为了确保一定的空域覆盖范围并提高信号的截获概率,侦察接收机普遍采用宽开的接收机制;另一方面,地面与空中的各种无线电子设备的数量日趋增多,信号频谱密度日益增强,形成了复杂多变的信号环境。这两方面的因素使得在接收到的信号中,多个信号在时域和频域同时重叠情况发生的概率大增,而现有的调制识别技术虽然方法众多,但是大多数并不适应多信号环境^[1-2];在目前的地面通信和雷达中,最常用的调制方式为相移键控信号,这类信号密度和强度都比较大。因此,在现代战场复杂电子对抗条件下,研究单通道多分量相移键控信号的调制识别技术,对提高电子侦察设备处理单通道时频重叠多辐射源信号的能力具有重要的意义。

现有的多信号调制识别技术有两种思路:其一为利用各种所谓的单通道分离算法得到各信号分量^[3-5],进而对每一路信号分量进行单信号调制识别;然而单通道信号分离算法本身就是一个待解决的难题^[1-2,6],只有具备足够的先验信息使病态的方程正定才能得到有效的信号分离结果。其二为直接从多分量信号中提取不受干扰的分量信息构建分类特征实现多信号调制识别。文献[7-8]综述了现有的调制识别方法和面临的问题,其中重点提到了复杂电磁环境下的多信号调制识别技术是调制识别技术未来发展的趋势;Spooner 为最

早涉及多信号调制识别技术的研究者^[9-10],但是当时电磁环境的复杂程度远远不及现在,故没有引起业界足够的重视;陆明泉等几乎同时在实验中发现了该问题^[1,11],但其提出的算法仅仅对频域重叠度在 20% 左右时的多信号有效,而且信噪比的适应性较差;文献[12-14]分别对所提调制特征的抗干扰性进行了仿真验证,但并没有系统地考虑多信号调制识别问题;文献[15]已知正常传输信号的所有参数和调制方式,进而对未知干扰信号进行调制识别,本质上仍为单信号调制识别。本文针对多分量相移键控信号的调制识别问题,弱化了文献[15]的限制条件,即仅仅知道时频域重叠的双信号的载频和码速率情况下,对两个信号分量的调制类型进行了识别。理论分析和仿真实验表明,本文提出的循环谱包络多信号调制识别方法能够适应某一给定调制集内的任意双相移键控信号,该方法针对单信号而言识别性能更优。

1 信号模型

假设两个独立辐射源传输的相移键控信号,信号集为 {BPSK, QPSK, MSK}, 其载频共属同一频段,码速率不等且不可约(该条件对于独立辐射源信号往往能够满足),伴随着高斯白噪声,则单通道电子侦察接收机截获的时频重叠多辐射源信号模型为

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

其中: $r(t)$ 为接收到的多分量信号; $w(t)$ 为方差为 σ_w^2 的高斯

收稿日期: 2012-02-13; 修回日期: 2012-04-01。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60971103); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(SWJTU11BR026)。

作者简介: 余志斌(1976-), 男, 湖南长沙人, 讲师, 博士, 主要研究方向: 信号与信息处理、模式识别; 于宁宇(1983-), 男, 河南中州人, 博士研究生, 主要研究方向: 信号处理。

白噪声; $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 为独立辐射源发射的相移键控信号,其数学表达式为

$$\begin{cases} s_i(t) = A_i [I(t) \cos(2\pi f_{ci}t + \varphi_{0i}) - Q(t) \sin(2\pi f_{ci}t + \varphi_{0i})] \\ I(t) = \sum_n a_{in} g_i(t - nT_{ci} - t_{0i}) \\ Q(t) = \sum_n b_{in} g_i(t - nT_{ci} - t_{0i}) \end{cases} \quad (2)$$

其中:下标 i 表示第 i 个信号; A_i 为幅度; a_{in} 和 b_{in} 的取值分别为 -1 和 1 ; $g_i(t)$ 为矩形脉冲; f_{ci} 为载波频率; T_{ci} 为码片时宽,其倒数为码速率; φ_{0i} 为初始相位, t_{0i} 为起始时间,为推导方便,假设 φ_{0i}, t_{0i} 均为 0 。对于二相相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK) 信号, $Q(t) = 0$; 对于最小移频键控(Minimum Shift Keying, MSK) 信号有

$$\begin{cases} I(t) = \sum_n a_{in} g_i(t - nT_{ci} - t_{0i} - T_{ci}/2) \cos(\pi t/T_{ci}) \\ Q(t) = \sum_n b_{in} g_i(t - nT_{ci} - t_{0i}) \sin(\pi t/T_{ci}) \end{cases} \quad (3)$$

三种信号的循环谱推导可以参考文献[12,16],在此不再赘述。不同于单信号调制识别,多信号调制识别要求同时获取各信号分量的调制方式,现有的方法一般都是先进行信号分离,再根据单信号调制识别算法实现各信号分量的调制方式识别。但是正如引言中所述,单通道多信号分离技术本身就是一个难题,因此,考虑不经分离直接提取各信号分量的特征成为解决多信号调制识别的另一思路。但是,要求特征提取方法不受因各分量信号交叠产生的交叉项干扰,即对独立分量的特征提取不能受到其他分量的影响,而现有的基于时域或频域的特征提取方法几乎都是因为分量间干扰导致特征混淆而使得识别方法失效。

2 算法原理及实现

2.1 多信号循环谱推导

针对信号模型式(1),先不考虑噪声影响,研究多信号的谱相关特性,其时变自相关函数可表示如下:

$$\begin{aligned} \hat{R}(t, \tau) &= E[r(t)r^*(t-\tau)] = \\ &E\{[s_1(t) + s_2(t)][s_1^*(t-\tau) + s_2^*(t-\tau)]^*\} = \\ &E[s_1(t)s_1^*(t-\tau)] + E[s_2(t)s_2^*(t-\tau)] + \\ &E[s_1(t)s_2^*(t-\tau) + s_2(t)s_1^*(t-\tau)] \end{aligned} \quad (4)$$

其中最后一项为信号与信号之间的交叉项,理论值为 0 。实际上,上述交叉项的循环平稳特性随数据长度渐近趋近于 0 ,详细分析可以参见文献[17],故式(4)可以写为:

$$\hat{R}(t, \tau) = \hat{R}_1(t, \tau) + \hat{R}_2(t, \tau) \quad (5)$$

由于傅里叶变换为线性变换,故对式(5)做二次傅里叶变换,可以得到多信号循环谱表达式为

$$\hat{S}_r^\alpha(f) = \hat{S}_{s1}^\alpha(f) + \hat{S}_{s2}^\alpha(f) \quad (6)$$

即多信号的循环谱相关函数等于单信号循环谱相关函数的线性组合。因此,理论上,只要两个信号具有独立的循环频率集,则时频域带来的信号重叠在循环频率域可以得到良好的区分,该循环频率上的调制特征仍然可以得到保留。因此,利用循环谱包络提取调制特征不受信号分量和平稳噪声的影响,能够满足上文所述的调制特征的互不干扰性。

2.2 特征的选择

特征提取和分类器设计是实现调制信号识别的两个重要步骤,良好的特征将使得分类器设计更为简单有效。本文基于循环谱相关对信号的独立性和对称性,提出了利用以下的调制特征来同时识别模型(1)中的两个调制集内的信号类型。

$$F1 = \left| \frac{\hat{S}_{r_{c1}}^{\frac{2}{T_{c1}}}(f = f_{c1}) + \hat{S}_{r_{c1}}^{-\frac{2}{T_{c1}}}(f = f_{c1})}{\hat{S}_{r_{c1}}^{\frac{1}{T_{c1}}}(f = f_{c1}) + \hat{S}_{r_{c1}}^{-\frac{1}{T_{c1}}}(f = f_{c1})} \right| \quad (7)$$

$$F2 = \left| \left\{ \hat{S}_{r_{c1}}^{\frac{2f_{c1} + \frac{1}{T_{c1}}}}(f = 0) + \hat{S}_{r_{c1}}^{\frac{2f_{c1} - \frac{1}{T_{c1}}}}(f = 0) + \hat{S}_{r_{c1}}^{-\frac{2f_{c1} + \frac{1}{T_{c1}}}}(f = 0) + \hat{S}_{r_{c1}}^{-\frac{2f_{c1} - \frac{1}{T_{c1}}}}(f = 0) \right\} \cdot \left\{ 2 \left(\hat{S}_{r_{c1}}^{\frac{1}{T_{c1}}}(f = f_{c1}) + \hat{S}_{r_{c1}}^{-\frac{1}{T_{c1}}}(f = f_{c1}) \right) \right\}^{-1} \right| \quad (8)$$

$$F3 = \left| \frac{\hat{S}_{r_{c2}}^{\frac{2}{T_{c2}}}(f = f_{c2}) + \hat{S}_{r_{c2}}^{-\frac{2}{T_{c2}}}(f = f_{c2})}{\hat{S}_{r_{c2}}^{\frac{1}{T_{c2}}}(f = f_{c2}) + \hat{S}_{r_{c2}}^{-\frac{1}{T_{c2}}}(f = f_{c2})} \right| \quad (9)$$

$$F4 = \left| \left\{ \hat{S}_{r_{c2}}^{\frac{2f_{c2} + \frac{1}{T_{c2}}}}(f = 0) + \hat{S}_{r_{c2}}^{\frac{2f_{c2} - \frac{1}{T_{c2}}}}(f = 0) + \hat{S}_{r_{c2}}^{-\frac{2f_{c2} + \frac{1}{T_{c2}}}}(f = 0) + \hat{S}_{r_{c2}}^{-\frac{2f_{c2} - \frac{1}{T_{c2}}}}(f = 0) \right\} \cdot \left\{ 2 \left(\hat{S}_{r_{c2}}^{\frac{1}{T_{c2}}}(f = f_{c2}) + \hat{S}_{r_{c2}}^{-\frac{1}{T_{c2}}}(f = f_{c2}) \right) \right\}^{-1} \right| \quad (10)$$

其中: $F1, F2$ 为信号分量 1 的调制特征值, $F3, F4$ 为信号分量 2 的调制特征值。由于两个信号分量具有独立的循环频率集,故该调制特征并没有因为干扰分量的存在而受到的影响,完全能够反映独立信号分量的调制特征。下面仅仅针对 $F1, F2$ 进行理论上的推导,得到的结论同样适用于 $F3, F4$ 。对 $F1$ 而言, $\alpha = \pm 1/T_{c1}, \pm 2/T_{c1}, \pm 2f_{c1} \pm 1/T_{c1}$ 为分量 1 的独有的循环频率集,故根据式(6)可以得到 $\hat{S}_r^\alpha(f) = \hat{S}_{s1}^\alpha(f)$, 将调制集内 3 类信号的谱相关函数分别代入式(7)和式(8)中,得到调制特征的理论值如表 1 所示,其中 $Q(f) = \sin(\pi f T_{c1})/\pi f$ 。由表 1 可以看出,通过以上两个特征参数即可区别信号分量 1 的调制类型。同理对 $F3, F4$ 进行分析,即可区分信号分量 2 的调制类型。理论上,仅仅利用参数 $F2, F4$ 即可完成 3 种信号类型的区分,对每个信号分量选择两个特征值主要是为了提高正确识别概率。

表 1 各信号的调制特征

信号类型	$F1$	$F2$
BPSK	$\left \frac{Q^2\left(2f_{c1} + \frac{1}{T_{c1}}\right) + Q^2\left(\frac{1}{T_{c1}}\right)}{Q^2\left(2f_{c1} + \frac{1}{2T_{c1}}\right) + Q^2\left(\frac{1}{2T_{c1}}\right)} \right $	$\left \frac{Q^2\left(2f_{c1} + \frac{1}{T_{c1}}\right) + Q^2\left(\frac{1}{2T_{c1}}\right)}{Q^2\left(\frac{1}{2T_{c1}}\right)} \right $
QPSK	$\left \frac{Q^2\left(2f_{c1} + \frac{1}{T_{c1}}\right) + Q^2\left(\frac{1}{T_{c1}}\right)}{Q^2\left(2f_{c1} + \frac{1}{2T_{c1}}\right) + Q^2\left(\frac{1}{2T_{c1}}\right)} \right $	0
MSK	∞	∞

2.3 分类器设计

为了便于实际应用,设计简单有效的分类器。分析表 1 中 $F1$ 特征可知,由于 $Q\left(2f_{c1} \pm \frac{1}{T_{c1}}\right) < Q\left(2f_{c1} \pm \frac{1}{2T_{c1}}\right)$ 且 $Q\left(\pm \frac{1}{T_{c1}}\right) < Q\left(\pm \frac{1}{2T_{c1}}\right)$, 故对 BPSK 和正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)而言, $F1$ 值小于 1 恒成立;对 MSK 而言,因为其谱相关函数在 $\alpha = \pm 1/T_{c1}$ 处没有值,而在 $\alpha = \pm 2/T_{c1}$ 处有值,故 $F1$ 趋于 ∞ 。因此,可以划分简单的门限 th_1 来区分 BPSK、QPSK 和 MSK 信号。进而对 $F2$ 进行分析, BPSK 的理论值为 1, QPSK 理论值为 0, 故选取门限 th_2 即可完成 BPSK 和 QPSK 的区分。同理,可以对信号分量 2 进行简单有效的识别。分类流程如图 1 所示。

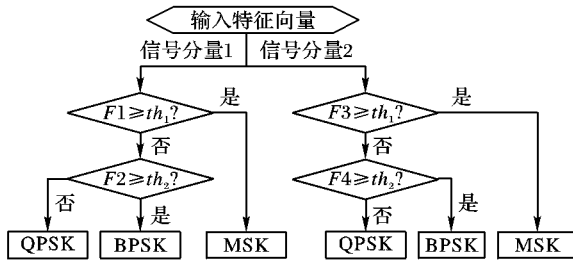


图1 信号分类流程

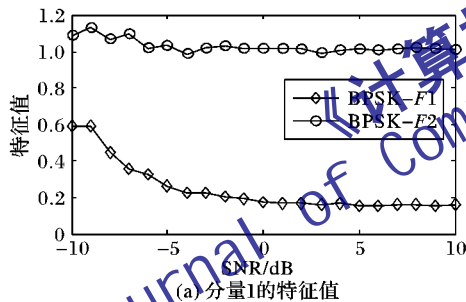
3 仿真实验与分析

为验证本文方法的有效性,设计如下仿真实验。参数设置如下:信号分量1和2均为随机的BPSK、QPSK或MSK信号,其中分量1载频为2000 Hz,码速率为563 Hz;分量2载频为2048 Hz,码速率为512 Hz,采样频率为8192 Hz;双信号时域完全重叠,频域重叠度在90%以上;采样点数为8192点,约500个码元,信噪比定义为双信号能量之和与噪声能量之比的10倍对数值。分别从调制特征对多分量时频重叠信号的适应能力和对双信号正确识别率两方面来验证本文方法的性能。

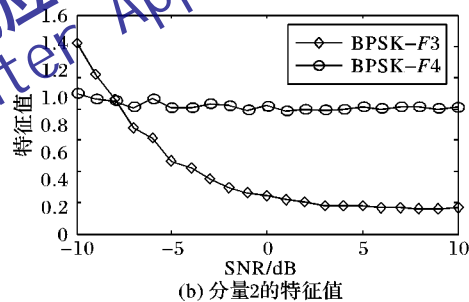
3.1 单信号的特征值与信噪比的关系

为了验证所提特征对多分量时频重叠信号的适应能力(即特征的互不干扰性),做如下实验:首先验证单信号情况下利用本文方法提取信号特征值随信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)变化的情况,结果如图2所示,为了更清晰地展示结果,将MSK信号的特征单独给出。

图2实验中,MSK信号的特征值 $F1$ 理论上趋于无穷大,

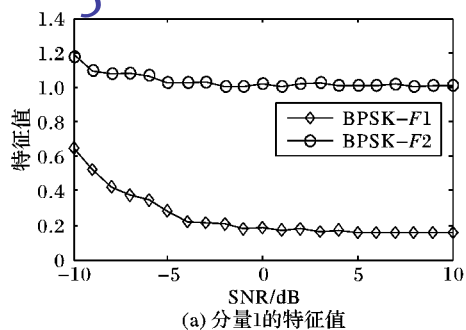


(a) 分量1的特征值

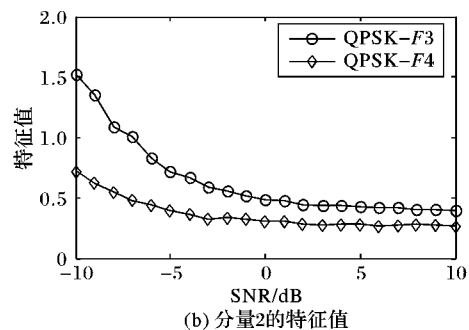


(b) 分量2的特征值

图3 BPSK + BPSK 的特征曲线

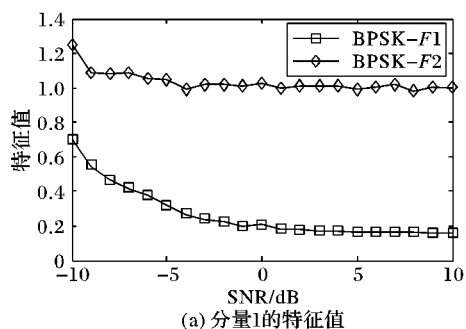


(a) 分量1的特征值

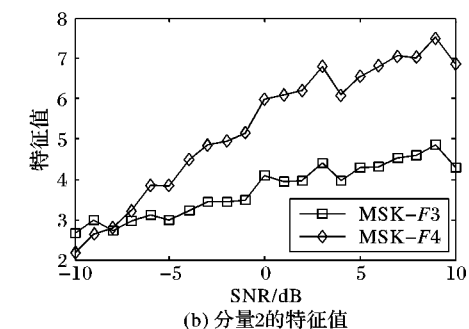


(b) 分量2的特征值

图4 BPSK + QPSK 的特征曲线



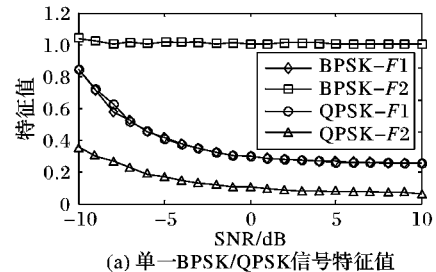
(a) 分量1的特征值



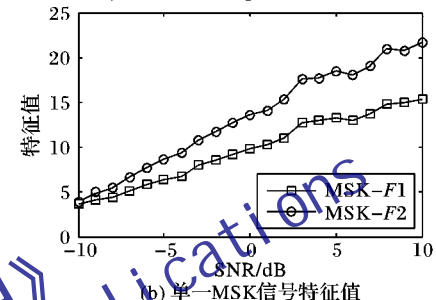
(b) 分量2的特征值

图5 BPSK + MSK 的特征曲线

而BPSK和QPSK信号的特征值总是小于1,故选择门限 $th_1 = 1.5$;然后区分BPSK和QPSK,BPSK的特征值 $F2$ 理论值为1,QPSK理论值为0,故选择门限 $th_2 = 0.5$ 来区分。这些特征具有良好的抗干扰能力,当接收的信号中为多分量信号时,假设分别为BPSK + BPSK信号(“+”表示组合);BPSK + QPSK信号和BPSK + MSK信号,按照本文方法提取的各分量的特征值随信噪比变化的曲线如图3~5所示。



(a) 单一BPSK/QPSK信号特征值



(b) 单一MSK信号特征值

图2 单信号的特征值随信噪比变化情况

从图 2~5 可以看出,不同调制组合下每个信号分量的特征并没有受到太大的影响,只是在信噪比低于 -5 dB 时 $F3$ 和 $F4$ 会出现交叠,当信噪比足够高时,完全可以同时实现双信号调制组合的识别。同时也表明:调制特征 $F1 \sim F4$ 受时频重叠多信号交叉项影响极少,故可以不经信号分离同时识别多分量信号中每个独立信号分量的调制类型。

3.2 时频重叠信号的调制识别率

提取调制特征 $F1 \sim F4$, 并使用 2.3 节的分类器对时频重叠信号进行调制识别。定义分量 1 和分量 2 的调制类型判别均正确为一次正确的识别,独立实验次数为 200,双信号功率比为 1:1,对不同调制组合(分量 1 + 分量 2)的双信号进行实验,并与文献[15]方法进行比较,实验结果如表 2 所示。表 2 中 $P1$ 表示本文方法的平均识别率, $P2$ 表示文献[15]方法的平均识别率。从表 2 可知,本文方法在 0 dB 处的平均正确识别率约为 97%。与文献[15]比较,在较低信噪比条件下,本文方法在更少的先验信息条件下得到了更好的调制识别效果,但是本方法需要复杂的运算和较大的数据长度。

表 2 不同调制组合的正确识别率

信号组合	SNR/dB						
	-9	-6	-3	0	3	6	9
BPSK + BPSK	0.80	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
BPSK + QPSK	0.29	0.63	0.95	0.97	0.98	0.99	0.99
BPSK + MSK	0.88	0.93	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00
QPSK + QPSK	0.12	0.55	0.82	0.96	1.00	0.98	0.98
QPSK + MSK	0.31	0.57	0.80	0.98	1.00	1.00	1.00
MSK + MSK	0.43	0.55	0.84	0.96	1.00	1.00	1.00
$P1$	0.47	0.70	0.90	0.98	1.00	1.00	1.00
$P2$	0.18	0.34	0.45	0.57	0.63	0.73	0.84

4 结语

针对复杂电磁环境下单通道接收机截获到的单通道时频重叠多信号难以有效识别的问题,提出了一种不经分离直接判别其调制方式的循环谱包络方法。首先推导了多分量信号的谱相关函数和单信号谱相关函数的关系,进而提出了信号分量特征的提取方法,从理论上推导了该分类特征对信号分量具有独立性。理论分析和仿真实验表明:1) 只要两个信号具有独立的循环频率集,则时频域重叠信号在循环频率域可以得到良好的区分,该循环频率上的调制特征仍然可以得到保留;2) 基于本文方法提取的调制特征几乎不受时频重叠多辐射源信号中分量信号相互干扰的影响,且不经信号分离便可以识别多分量信号中每个独立信号分量的调制类型;3) 使用本文方法能在更少的先验信息和较低的信噪比条件下,获得更好的调制识别效果。但是,本文方法与现有算法相比,需要复杂的运算和较大的数据长度,这也是在今后的研究和实

际工程应用中需要解决的问题。

参考文献:

- [1] 陆明泉. 多信号的调制识别技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- [2] 魏平. 共信道重叠多信号的分离识别[J]. 通信对抗, 2005(1): 1-10.
- [3] YESTE-OJEDA O A, GRAJAL J. Cyclostationarity-based signal separation in interceptors based on a single sensor[C]// RADAR'08: IEEE Radar Conference. Piscataway: IEEE, 2008: 1-6.
- [4] CHRISTENSEN M G, JAKOBSSON A. Optimal filter designs for separating and enhancing periodic signals[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(12): 5969-5983.
- [5] 崔荣涛, 李辉, 万坚, 等. 一种基于过采样的单通道 MPSK 信号盲分离算法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(3): 566-569.
- [6] 彭耿, 黄知涛, 姜文利, 等. 单通道盲信号分离研究进展与展望[J]. 中国电子科学研究院学报, 2009, 4(3): 268-277.
- [7] DOBRE O A, ABDI A, BAR-NESS Y, et al. Survey of automatic modulation classification techniques: classical approaches and new trends[J]. IET Communications, 2007, 1(2): 137-156.
- [8] RAMKUMAR B. Automatic modulation classification for cognitive radios using cyclic feature detection[J]. IEEE Circuits and Systems Magazine, 2009, 9(2): 27-45.
- [9] SPOONER C M. Classification of co-channel communication signals using cyclic cumulants[C]// Proceedings of the 29th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Washington, DC: IEEE Computer Society, 1995: 531-536.
- [10] SPOONER C M. On the utility of sixth-order cyclic cumulants for RF signal classification[C]// Proceedings of the 35th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2001, 1: 890-897.
- [11] 陆明泉, 肖先赐. 同信道多信号的调制识别方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2009, 49(10): 103-107.
- [12] 高玉龙, 张中兆. 基于循环谱的同信道多信号调制方式识别[J]. 高技术通讯, 2007, 17(8): 793-797.
- [13] 李建东, 冯祥. 基于支持矢量机和循环累积量的调制识别算法[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(4): 520-523.
- [14] 冯祥, 李建东. 基于高阶循环累积量的 SQAM 信号调制识别算法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(1): 125-128.
- [15] 程汉文, 朱雷, 吴乐南. 基于累计量的干扰信号调制识别算法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(7): 1741-1745.
- [16] YU NINGYU, MA HONGGUANG, SHI RONG. Modulation recognition of co-channel OQPSK and MSK based on cyclostationarity[C]// The 2nd IEEE International Conference on Information Management and Engineering. Piscataway: IEEE, 2010: 284-287.
- [17] 金艳, 姬红兵. 基于循环自相关的 PSK 信号码速率估计的噪声影响分析[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(2): 505-508.

(上接第 2118 页)

- [5] SOLJANIN E. Network multicast with network coding[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(5): 109-112.
- [6] HAN ZHU, ZHANG XING, POOR H V. High performance cooperative transmission protocols based on multiuser detection and network coding[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(5): 2352-2361.
- [7] XIAO MING, SKOGLUND M. Multiple-user cooperative communications based on linear network coding[J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(12): 3345-3351.
- [8] 季彦呈, 葛建华, 李靖. 一种协作网络编码方案的功率优化分配方法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(11): 2576-2581.
- [9] ARGYRIOU A, PANDHARIPANDE A. Cooperative protocol for analog network coding in distributed wireless networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(10): 3112-3119.
- [10] ANDREA G. Wireless communications[M]. London: Cambridge University Press, 2005.
- [11] 田心记, 袁超伟, 胡紫巍, 等. 基于相位旋转的多跳 Alamouti 放大转发协作方案[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(4): 880-884.