

# 基于高阶累积量和信号平方谱特征的 复合调制信号盲识别

许琦敏<sup>1</sup>, 万 峻<sup>2</sup>, 何 玲<sup>1,3</sup>, 王 茜<sup>1,3</sup>

(1. 电子科技大学航空航天学院, 四川成都 611731; 2. 国家无线电监测中心成都监测站, 四川成都 611136;  
3. 飞行器集群智能感知与协同控制四川省重点实验室, 四川成都 611731)

**摘 要:** 针对符合CCSDS(Consultative Committee for Space Data Systems, 国际空间数据系统咨询委员会)标准的多种复合调制体制测控信号, 本文在建立8类典型调制信号数学模型的基础上, 分析了信号的频域和统计域特征, 并基于高阶累积量和信号平方谱提取了4个特征参数. 根据所提的特征参数, 针对复合调制信号提出了一种基于特征提取的直接识别方法, 给出了具体的识别流程, 并在11种信噪比下对该识别方法进行了MATLAB仿真实验. 仿真结果表明在2 dB信噪比条件下, 8类信号的识别率均达到98%, 证明了所提复合调制盲识别方法的有效性.

**关键词:** 复合调制; 高阶累积量; 平方谱特征; 调制盲识别

中图分类号: TN911.6

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2022)02-0426-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20201287

## Blind Recognition for Hybrid Modulation Signals Based on High-order Cumulant and Squared Spectrum Feature

XU Qi-min<sup>1</sup>, WAN Jun<sup>2</sup>, HE Ling<sup>1,3</sup>, WANG Qian<sup>1,3</sup>

(1. School of Aeronautics and Astronautics, University of Electronic and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China;

2. Chengdu Monitoring Station of The State Radio Monitoring Center, Chengdu, Sichuan 611136, China;

3. Aircraft Swarm Intelligent Sensing and Cooperative Control Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 611731, China)

**Abstract:** Aiming at multi-type hybrid modulation TT&C(telemetry, track and command) signals that comply with CCSDS(consultative committee for space data systems) standards, this paper analyzes the frequency domain and statistical domain characteristics of the signals on the basis of establishing eight types of typical modulation signal mathematical models, and four characteristic parameters are extracted based on the high-order cumulant and the squared spectrum of the signal. According to the proposed characteristic parameters, a direct identification method based on feature extraction is proposed for the multi-type hybrid modulation. The specific recognition process is given in the paper, and MATLAB simulation experiments are carried out on this recognition method under 11 signal-to-noise ratios. The simulation results show that under the condition of 2 dB signal-to-noise ratio, the recognition rates of 8 types of signals reach 98%, which proves the effectiveness of the proposed hybrid modulation blind recognition method.

**Key words:** hybrid modulation; high-order cumulant; squared spectrum feature; modulation blind recognition

## 1 引言

在航空航天、卫星系统和通信技术快速发展的推动下, 为了获取复杂电磁环境中蕴藏的信息并实施信号认证、频率管控、威胁探测、干扰压制等行动, 对未知复杂信号形成足够的认知是必备前提. 信号的调制方式不仅是测控通信系统类型的重要表征, 也为测控通

信侦察提供了基础, 因此调制样式识别是未知信息感知和获取不可或缺的核心技术. 测控信号的调制方式不断地变化: 第一代测控信号是单一调制方式改进后的模-模复合调制方式, 以FM-FM信号为代表; 第二代测控信号加入了数字调制, 形成了模-数复合调制方式, 其基带信号通常先经过脉冲编码调制(Pulse Code Mod-

ulation, PCM), 以 PCM-FM 和 PCM-BPSK-PM 信号为代表; 第三代测控信号采用了直接扩频技术, 以 DS/BPSK 信号为代表. 第一代测控信号和第二代测控信号均采用的是复合调制方式, 该方式是一种二次调制方式, 通常是对载波进行两种及以上的调制, 即有主载波和副载波之分. 不同于单一调制和多辐射源混合信号, 复合调制信号结合了多种调制方式的特征, 具有很强的隐蔽性, 符合测控系统安全要求, 同时对接收端检测和处理也提出了较高要求.

针对单一调制信号识别的方法较多, 且在深度学习的支持下可实现自适应识别, 以此减少手动提取特征的误差. 由于复合调制信号不仅表现出一种调制方式, 并且基于深度学习的调制识别参数设置比较困难, 因此针对复合调制信号识别的研究正在持续推进中, 完整的理论体系和成熟技术方法尚未形成. 文献[1, 2]采用的是直接提取特征识别的思路, 即在不去除主载波的情况下对复合调制信号提取相应特征进行识别, 该识别思路避免了载频估计和载波同步的误差, 但文献中所选特征参数较为简单, 能区分的信号种类很少, 且在低信噪比下的识别率很低. 由于复合调制信号的内层信号通常是常规的数字调制信号, 因此在去除主载波后, 可在已有识别方法的基础上设计识别流程. 文献[3, 4]利用解析正交变换法将复合调制信号的主载波与副载波分离, 并通过提取副载波信号高次方谱特征完成了信号识别. 考虑到主载波调制样式的特点, 文献[5]先对复合调制信号进行解调处理, 再对解调后的信号提取瞬时相位, 利用瞬时相位与内层调制信号的关系可区分外层调制为 PM 和 FM 的复合调制信号. 复合调制信号的内层调制还可以由多路信号组成, 针对这类多副载波信号常采用内层分路<sup>[2, 6]</sup>的思想, 即将多路内层信号分为单路信号进行识别.

通过分析上述文献发现, 复合调制信号的识别主要分为直接提取特征和预处理得到内层调制后再提取特征 2 种思路. 前者的特征选取不易, 简单特征的区分度不明显且易受噪声影响, 后者的预处理包括载频估计<sup>[7]</sup>、调制指数估计<sup>[8]</sup>、解调和分路等环节, 各环节的误差对最后的识别结果有很大影响. 因此研究多类型复合调制信号的快速、准确的识别算法是很有必要的. 本文给出了 PCM/BPSK、PCM/QPSK、PCM/UQPSK、PCM/BPSK/PM、PCM/QPSK/PM、PCM/BPSK/BPSK/PM、PCM/BPSK/QPSK/PM、PCM/QPSK/QPSK/PM 多种类型的复合调制信号时域表示, 分析了信号的平方谱及高阶累积量特点, 提取 4 个特征参数完成了对上述 8 种信号的识别.

## 2 调制信号模型

通常把从模拟信号抽样、量化直到变换成二进制

符号的基本过程称为脉冲编码调制, CCSDS (Consultative Committee for Space Data Systems, 国际空间数据系统咨询委员会) 标准建议基带码元采用 NRZ-L 码型, 即需要将 PCM 信号转换成 NRZ-L 码型再进行调制<sup>[9]</sup>, 调制基带信号产生的基本流程如图 1 所示.

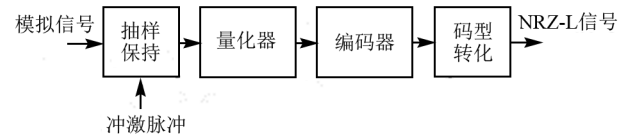


图1 标准码型的基带信号产生流程

### 2.1 PCM/BPSK 信号

PCM/BPSK 信号的数学表达式为

$$e_{\text{PCM/BPSK}}(t) = \sum_n a_n g(t - nT_d) \cos \omega_c t \quad (1)$$

其中,  $\omega_c$  为载波频率,  $a_n$  是码型为 NRZ-L 的 PCM 信号,  $T_d$  是 PCM 信号的码元持续时间,  $g(t)$  是脉宽为  $T_d$  的码元成型脉冲, 理想条件下为矩形脉冲, 实际中多采用升余弦等脉冲. 在 BPSK 信号中通常使用二进制“1”和“0”表示相位 0 和  $\pi$ , 即: 若相位为 0, 则  $a_n$  取 1; 若相位为  $\pi$ , 则  $a_n$  取 -1.

### 2.2 PCM/QPSK 信号

PCM/QPSK 信号也是利用载波的相位变化来传递数字信息, 其载波有 0、 $\pi/2$ 、 $\pi$ 、 $3\pi/2$  四种相位, 相位对应信息码元分别为 00、10、11 和 01. 信号的时域表达式为

$$e_{\text{PCM/QPSK}}(t) = \left[ \sum_n a_n g(t - nT_d) \right] \cos \omega_c t + \left[ \sum_n b_n g(t - nT_d) \right] \sin \omega_c t \quad (2)$$

由式(2)可知, 可将 QPSK 信号看成幅度相同、码元同步的两路正交的 BPSK 信号叠加而成.

### 2.3 PCM/UQPSK 信号

UQPSK 信号是非均衡的 QPSK 信号, UQPSK 信号的两路正交信号的幅度不等, 功率不同, 其数学表达式为

$$e_{\text{PCM/UQPSK}}(t) = \alpha \left[ \sum_n a_n g(t - nT_d) \right] \cos \omega_c t + (1 - \alpha) \left[ \sum_n b_n g(t - nT_d) \right] \sin \omega_c t \quad (3)$$

其中,  $\alpha$  为均衡因子, 表征两路正交信号的幅度, 取值范围为 0 到 1.

当  $\alpha$  取 0.5 时, 两路正交信号的幅度相等, 此时即为 QPSK 信号; 当  $\alpha$  取 0 或 1 时, 两路正交信号中某一路信号为 0, 此时即为 BPSK 信号. 除了上述 2 种特殊情况外, UQPSK 信号是介于 BPSK 信号和 QPSK 信号之间的,  $\alpha$  越靠近 0, 则 UQPSK 信号越接近于 BPSK 信号.

## 2.4 PCM/MPSK/PM 信号

PCM/MPSK/PM 信号是由初始信息经过 PCM 编码、MPSK 调制以及 PM 调制得到的复合调制信号。其中 MPSK 调制称为内调制或一次调制,对应的调制载波称为副载波,主要用于携带信息来完成通信;PM 调制称为外调制或二次调制,对应的调制载波称为主载波,主要用于探测。上述复合调制信号的表达式为

$$s_{\text{PCM/MPSK/PM}}(t) = A \cos[\omega_c t + K_p f(t)] \quad (4)$$

其中,  $A$  为恒定的载波振幅;  $K_p$  为调相灵敏度 (rad/V), 代表由单位调制信号幅度引起的 PM 信号相位偏移量;  $f(t)$  为经过 1 次调制的 MPSK 信号。

## 2.5 多副载波信号

所谓多副载波信号,即经过不同副载波调制的 PCM 信号经过线性叠加后再调制到同一主载波上的复杂调制信号。其副载波调制的方式为常用的数字调制方式,根据 CCSDS 建议书<sup>[10]</sup>,副载波调制方式多为 BPSK 和 QPSK。这类多载波调制信号的数学表达式就是将 PCM/MPSK/PM 信号表达式中的  $f(t)$  用叠加信号  $F(t) = f_1(t) + f_2(t) + \dots + f_n(t)$  代替。

## 3 信号特征

在现有经典调制识别方法中,常用的特征有信号的瞬时域参数、小波变换、高阶矩<sup>[11]</sup>、循环平稳特性<sup>[12]</sup>、星座图特性<sup>[13]</sup>以及功率谱特征等。文献[14]针对 QPSK/FM 二次调制信号提取了 3 类特征,并采用了一种融合思路完成识别,但该方法的部分特征需要在信号外层调制解调后完成,并且若采用不同的融合权重设定方法,最终的识别结果也可能发生改变。文献[15]利用信号的功率谱、高次方谱以及瞬时幅度的特征识别了常规数字信号的调制方式,但特征参数的计算需要预先估计信号的功率谱,而估计结果的精确度将影响最终的识别效果。

鉴于非合作通信信号的信息未知,且复合调制信号的瞬时特征没有明显的区分,因此本文提取接收信号的高阶累积量和平方谱特征进行信号的调制识别。一方面,高阶累积量对噪声有一定的抑制作用,且平方谱能够有效地区分出 BPSK 和 QPSK 信号;另一方面,2 类特征参数均不需要先验信息,可简化识别流程。

### 3.1 高阶累积量

在复合调制信号的间接识别方法中,信号的正确识别率会受到信号参数估计和解调过程中所产生的误差的影响。为了提高正确识别率,并减少识别流程中对先验信息的依赖,本文根据接收信号高阶累积量值的

差异,通过计算  $|C_{42}|$ 、 $|C_{40}|$  和  $|C_{42}|/|C_{40}|$  区分出了复合调制信号和常规的数字调制信号。

假设高频复信号的模型为

$$r[k] = x[k] + n[k] = c_k e^{j[\omega_c k + K_p f[k]]} + n[k] \quad (5)$$

其中,  $c_k$  表示信号幅度;  $\omega_c = 2\pi f_c / f_s$ ,  $f_c$  为载波频率,  $f_s$  为采样频率;  $f[k]$  为内调制信号;  $n[k]$  为高斯白噪声。

平稳信号  $x(t)$  的高阶累积量定义为

$$C_{20} = \text{cum}(X, X) = M_{20} \quad (6)$$

$$C_{21} = \text{cum}(X, X^*) = M_{21} \quad (7)$$

$$C_{40} = \text{cum}(X, X, X, X) = M_{40} - 3M_{20}^2 \quad (8)$$

$$C_{42} = \text{cum}(X, X, X^*, X^*) = M_{42} - M_{20}^2 - 2M_{21}^2 \quad (9)$$

其中,  $M_{pq}$  表示平稳信号  $x(t)$  的  $p$  阶混合矩,定义为

$$M_{pq} = E \left\{ [x(t)]^p [x^*(t)]^q \right\} \quad (10)$$

由于信号与噪声相互独立,且由高阶累积量的性质知,零均值高斯白噪声其二阶以上的累积量为 0,因此  $r[k]$  的四阶累积量就是  $x[k]$  的四阶累积量值。假设数字调制的成型脉冲为矩形脉冲,在非合作通信的情况下,只能对有限的观测数据进行计算,当信号的观测长度为  $N$  时,信号的  $C_{20}$  和  $C_{21}$  的计算式为

$$\begin{aligned} C_{20} &= M_{20} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x^2[k] \\ &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N c_k^2 e^{j2[\omega_c k + K_p f[k]]} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} C_{21} &= M_{21} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |x[k]|^2 \\ &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left| c_k e^{j[\omega_c k + K_p f[k]]} \right|^2 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{令 } S_1 = c_k^2 e^{j2[\omega_c k + K_p f[k]]}, S_2 = \left| c_k e^{j[\omega_c k + K_p f[k]]} \right|^2, \text{ 结合式}$$

(8)和式(9),有

$$C_{40} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_1^2 - \frac{3}{N^2} \left( \sum_{k=1}^N S_1 \right)^2 \quad (13)$$

$$C_{42} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_2^2 - \frac{1}{N^2} \left| \sum_{k=1}^N S_1 \right|^2 - \frac{2}{N^2} \left( \sum_{k=1}^N S_2 \right)^2 \quad (14)$$

其中,  $f[k]$  的表达式为

$$f[k] = \begin{cases} 0 \\ A_k \cos(2\pi f_{sc} k + \varphi_k) \\ A_k \cos(2\pi f_{sc1} k + \varphi_k) + B_k \cos(2\pi f_{sc2} k + \varphi_k) \end{cases}$$

其中,从上到下分别对应 PCM/MPSK 信号、PCM/MPSK/PM 信号以及多副载波信号的内层调制表达式。

根据上述的计算公式,对固定观测长度的接收信号的高阶累积量在无噪声的理想条件下进行了仿真,参数设置如表 1 所示。

表1 仿真参数

载波频率	70 MHz
副载波频率1	20 KHz
副载波频率2	40 KHz
码速率	1 Mbit/s
观测信号的长度	4 096

各信号  $|C_{40}|$  和  $|C_{42}|$  的理想值如表2所示. 由仿真结果可知,各信号的  $|C_{40}|$  值存在较明显的差异,  $|C_{42}|$  能很好地将 PCM/UQPSK 信号从单载波调制信号中识别出来,且该值在低信噪比情况下很稳定.

表2 各类信号  $|C_{40}|$  和  $|C_{42}|$  的理想值

复合调制信号类型	$ C_{40} $	$ C_{42} $
PCM/BPSK	0.013	0.995
PCM/QPSK	0.019	0.995
PCM/UQPSK	0.001	0.067
PCM/BPSK/PM	0.226 7	0.924 3
PCM/QPSK/PM	0.117 7	0.961 3
PCM/BPSK/QPSK/PM	0.393 8	0.868 7
PCM/QPSK/QPSK/PM	0.430 8	0.856 6
PCM/BPSK/BPSK/PM	0.769 1	0.742 9

2 类多副载信号 PCM/BPSK\_QPSK/PM 和 PCM/QPSK\_QPSK/PM 的高阶累积量值的差异不明显,因此本文选取 2 个高阶累积量值的比  $|C_{42}| / |C_{40}|$  作为参数来区分两种多副载波信号. 信号的仿真参数设置同上,信号高阶累积量比的理想值  $|C_{42}| / |C_{40}|$  如表3所示.

表3  $|C_{42}| / |C_{40}|$  的理想值

复合调制信号类型	$ C_{42}  /  C_{40} $
PCM/QPSK/QPSK/PM	1.988
PCM/BPSK/QPSK/PM	2.208

### 3.2 平方谱特征

由 3.1 的分析可知,由于接收到的 PCM/BPSK 和 PCM/QPSK 信号在相同基带码元下的调制幅度相近,其高阶累积量的值的差异不明显. 因此对 PCM/BPSK 信号和 PCM/QPSK 信号进行平方运算得

$$e^2_{\text{BPSK}}(t) = \left( \sum_n a_n g(t-nT_d) \right)^2 \cos^2 \omega_c t \quad (15)$$

$$= \frac{1}{2} \left( \sum_n a_n g(t-nT_d) \right)^2 (1 + \cos 2\omega_c t)$$

$$e^2_{\text{QPSK}}(t) = \left[ \sum_n a_n g(t-nT_d) \right]^2 \cos^2 \omega_c t$$

$$+ \left[ \sum_n b_n g(t-nT_d) \right]^2 \sin^2 \omega_c t$$

$$+ 2 \left[ \sum_n a_n g(t-nT_d) \right] \left[ \sum_n b_n g(t-nT_d) \right] \cos \omega_c t \cdot \sin \omega_c t \quad (16)$$

分析式(15)和式(16)可知,PCM/BPSK 信号和 PCM/QPSK 信号相比,其平方谱在载波频率的二倍频处会出现离散谱线,故可利用两者平方谱的差异<sup>[3]</sup>构造特征识别两种信号. 平方谱特征参数  $P$  表达式为

$$P = \frac{P_2 + P_3}{P_1} \quad (17)$$

其中,  $P_1, P_2, P_3$  分别是信号平方谱中除零频外谱线幅值最大值、次大值、第三大值. 在相同的基带码元、载频以及码速率的情况下,PCM/BPSK 信号的特征参数  $P$  的值会比 PCM/QPSK 信号的值要小,故可据此对 2 种信号进行识别. 仿真参数设置见表1, PCM/BPSK 和 PCM/QPSK 信号的特征参数  $P$  随信噪比变化情况如图2所示.

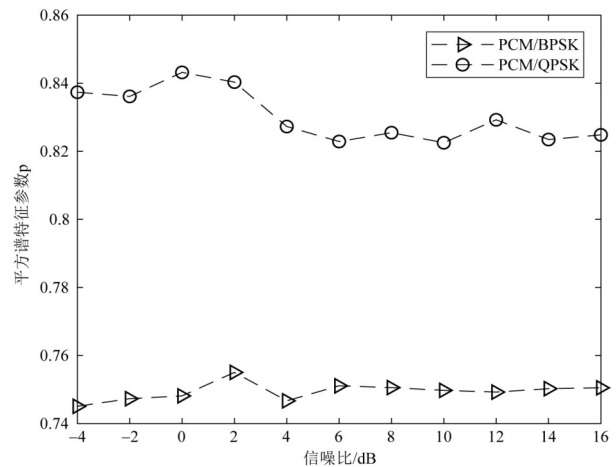


图2 特征参数  $P$  随信噪比的变化曲线

### 4 识别流程及仿真实验

根据 3.1 和 3.2 中所提取的特征参数,设  $c1, c2, c3, c4$  分别为  $|C_{40}|, |C_{42}|, |C_{42}| / |C_{40}|$  和  $P$ ,复合调制信号的直接识别流程如图3所示.

识别流程图3中特征参数门限值的取值如表4所示,仿真参数的设置见表1.

按照图3的识别流程,利用 MATLAB 对 8 种信号在每种信噪比下进行 2 000 次蒙特卡洛试验得到了信号在 11 种不同信噪比下的正确识别率,仿真结果如图4所示.

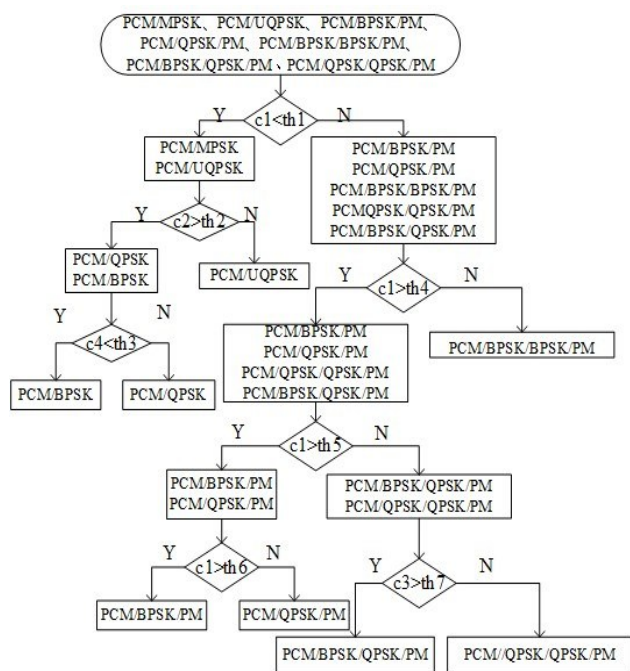


图3 复合调制信号盲识别流程

表4 识别流程的门限取值

th1	th2	th3	th4	th5	th6	th7
0.1	0.5	0.79	0.68	0.32	0.205	2.13

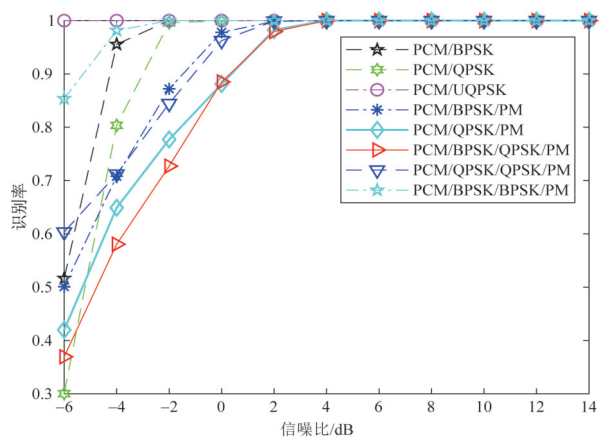


图4 信号在不同信噪比下的识别率

由仿真结果可知,当信噪比在4 dB以上时,所有信号的识别率均可达到100%。其中信号PCM/BPSK和PCM/BPSK/BPSK/PM在-2 dB时能100%正确识别,PCM/QPSK和PCM/UPQSK分别在信噪比为2 dB和-6 dB时达到100%的识别率。总体上,在2 dB信噪比条件下所有信号的识别率均可达到98%。但在0 dB及以下信噪比条件下,部分复合调制信号的识别效果不佳。另外,仿真试验目前仅考虑高斯白噪声,尚未考虑信号的频偏、多径效应等其他情况。

### 5 总结

本文选择高阶累积量和信号频谱特征,在无需参数估计和解调的前提下完成对复合调制类型的盲识别,仿真结果表明这种直接识别的方法在信噪比较好的情况下能获得很高的识别率。基于目前的研究,下一步将对信号的载频、码速率、调制指数等必要参数进行预先估计,对复合信号进行解调、分路等操作后再进行识别,以此提高信号在低信噪比条件下的识别率。

### 参考文献

- [1] 孙侃. 面向测控信号侦察的调制样式识别方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.  
SUN K. Modulation Pattern Recognition Method for Detection and Control Signal Detection[D]. Harbin, China: Harbin Engineering University, 2018. (in Chinese)
- [2] 刘春桃. 卫星测控信号调制识别技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.  
LIU C T. Research on Modulation Recognition Algorithm of Satellite TT&C Signal[D]. Changsha, China: National University of Defense Technology, 2017. (in Chinese)
- [3] 王世剑. 测控系统中复合调制信号的识别与参数估计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.  
WANG S J. Recongnition and Parameter Estimation of Hybrid Modulation Signal in TT&C[D]. Harbin, China: Harbin Engineering University, 2019. (in Chinese)
- [4] 吴星. 遥测遥控信号的被动解调技术[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.  
WU X. The Passive Demodulation Technology of Tracking, Telemetry, and Command Signals[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2014. (in Chinese)
- [5] 王利全. 数传信号的调制识别与参数估计[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.  
WANG L Q. Modulation Recognition and Parameter Estimation of Signals for Data Communication[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2020. (in Chinese)
- [6] 邢建泉. 卫星信息链路信号调制识别技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.  
XING J Q. Research on Modulation Recognition for Signals in Satellite-links[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2012. (in Chinese)
- [7] 龚超, 张邦宁, 郭道省. 基于FFT的快速高精度载波参数联合估计算法[J]. 电子学报, 2010, 38(4): 766-770.

GONG C, ZHANG B N, GUO D X. A quick and accurate union carrier parameter estimation algorithm based on FFT [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(4): 766-770. (in Chinese)

- [8] 彭耿, 黄知涛, 姜文利, 等. 角度调制信号调制指数盲估计研究[J]. 电子学报, 2010, 38(4): 737-741.

PENG G, HUANG Z T, JANG W L, et al. Blind estimation of modulation index for angle modulation signals[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(4): 737-741. (in Chinese)

- [9] 何羚, 许琦敏, 阎啸, 等. 一种基于融合特征的复合调制信号盲识别方法: 202110210447.1[P]. 2022-01-11.

- [10] CCSDS 401.0-B-30, Radio Frequency and Modulation Systems-Part1: Earth Stations and Spacecraft[S]. Washington, USA: CCSDS Secretariat, 2011.

- [11] HAZZA A, SHOAIB M, ALSHEBEILI S A, et al. An overview of feature-based methods for digital modulation classification[C]//2013 1st International Conference on Communications, Signal Processing, and their Applications(ICCSIPA). Shar jah, United Arab Emirates: IEEE, 2013: 1-6.

- [12] 张俊林, 王彬, 汪洋, 等. 一种  $\alpha$  稳定分布噪声下 OFDM 信号调制识别与参数估计算法[J]. 电子学报, 2018, 46(6): 1390-1396.

ZHANG J L, WANG B, WANG Y, et al. An algorithm for recognition and parameters estimation of OFDM in alpha stable distribution noise[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(6): 1390-1396. (in Chinese)

- [13] 韩钢, 李建东, 李长乐, 等. 一种改进的基于累积量的 MDPSK 信号分类算法[J]. 电子学报, 2004, 32(10): 1613-1616.

HAN G, LI J D, LI C L, et al. An improved classification algorithm of MDPSK signals based on cumulants[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(10): 1613-1616. (in Chinese)

- [14] 鲁战锋, 熊刚. 一种基于二次调制的多载波信号识别方法[J]. 通信技术, 2018, 51(8): 1811-1814.

LU Z F, XIONG G. Multi-carrier signal recognition based on two-leveled modulation[J]. Communications Technology, 2018, 51(8): 1811-1814. (in Chinese)

- [15] 吴月娴, 葛临东, 许志勇. 常用数字调制信号识别的一种新方法[J]. 电子学报, 2007, 35(4): 782-785.

WU Y X, GE L D, XU Z Y. A novel identification method for commonly used digital modulations[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(4): 782-785. (in Chinese)

## 作者简介



许琦敏 女, 1997 年出生, 四川遂宁人. 电子科技大学在读硕士研究生. 主要研究方向为空间信息处理.

E-mail: xuqimin\_l@163.com



万峻 女, 1972 年出生, 四川成都人. 任职于国家无线电监测中心成都监测站, 高级工程师, 长期从事无线电监测工作. 主要研究方向为无线电监测、信息技术.

E-mail: wanjun@srrc.org.cn



何羚(通讯作者) 女, 1972 年出生, 江苏镇江人. 电子科技大学航空航天学院副教授. 主要研究方向为空间电磁态势感知、信号与信息处理、频域测试.

E-mail: heling@uestc.edu.cn



王茜 女, 1984 年出生, 四川成都人. 电子科技大学副教授. 主要研究方向为信号检测、通信信号测试、数字信号处理.

E-mail: job\_wangqian@uestc.edu.cn