

1-18-2023

Modulation Recognition Method of Mixed Signal Based on Intelligent Analysis of Cyclic Spectrum Section

Yu Du

China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100, China; yangwc@cast504.com

Xinquan Yang

China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100, China;

Jianhua Zhang

China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100, China;

Suchun Yuan

China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Modulation Recognition Method of Mixed Signal Based on Intelligent Analysis of Cyclic Spectrum Section

Abstract

Abstract: Aiming at the problems of low intelligence and poor adaptability for the existing mixed signal recognition methods, an intelligent recognition method based on cyclic spectral cross section and deep learning is proposed. *For common mixed communication signals, the characteristics of zero frequency cross section of cyclic spectrum are theoretically deduced and analyzed. Two new pre-processing methods, nonlinear segmental mapping and directional pseudo-clustering are proposed, which can effectively improve the adaptability and consistency of cross section features. The pre-processed feature graph is combined with the residual network (ResNet), and the deep learning network is used to mine and analyze the deep details of modulation information in the feature graph, and the effective recognition of mixed signals is realized.* Simulation results show that the method is insensitive to noise, and the average recognition rate is more than 90% when the SNR is no less than -2dB. The proposed method has good adaptability to the variation of signal parameters and energy ratio between signals.

Keywords

communication signal processing, deep learning, modulation recognition, cyclic spectrum, residual network

Authors

Yu Du, Xinquan Yang, Jianhua Zhang, Suchun Yuan, Huachao Xiao, and Jingjing Yuan

Recommended Citation

Yu Du, Xinquan Yang, Jianhua Zhang, Suchun Yuan, Huachao Xiao, Jingjing Yuan. Modulation Recognition Method of Mixed Signal Based on Intelligent Analysis of Cyclic Spectrum Section[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(1): 146-157.

基于循环谱截面智能分析的混合信号调制识别方法

杜宇, 杨新权, 张建华, 袁素春, 肖化超, 袁晶晶

(中国空间技术研究院 西安分院, 陕西 西安 710100)

摘要: 针对已有混合信号识别方法存在智能化程度低、适应性差等问题, 提出了一种基于循环谱截面和深度学习相结合的智能识别方法。理论推导分析了常见混合通信信号的循环谱零谱频率截面特征; 利用提出的非线性分段映射和指向性伪聚类新方法对上述截面图进行预处理特征增强, 提高了截面特征的适应性和一致性; 并将预处理后的特征图与经典残差网络相结合, 利用深度学习网络对特征图中调制信息的深层次细节挖掘分析能力, 实现了混合信号的有效识别。仿真结果表明, 该方法对噪声不敏感, 当信噪比不低于-2 dB 时, 平均识别率大于 90%; 且该方法对信号参数及信号间能量比变化有较好的适应能力。

关键词: 通信信号处理; 深度学习; 调制识别; 循环谱; 残差网络

中图分类号: TN911.72; TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)01-0146-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0239

引用格式: 杜宇, 杨新权, 张建华, 等. 基于循环谱截面智能分析的混合信号调制识别方法[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(1): 146-157.

Reference format: Du Yu, Yang Xinquan, Zhang Jianhua, et al. Modulation Recognition Method of Mixed Signal Based on Intelligent Analysis of Cyclic Spectrum Section[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(1): 146-157.

Modulation Recognition Method of Mixed Signal Based on Intelligent Analysis of Cyclic Spectrum Section

Du Yu, Yang Xinquan, Zhang Jianhua, Yuan Suchun, Xiao Huachao, Yuan Jingjing

(China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100, China)

Abstract: Aiming at the problems of low intelligence and poor adaptability for the existing mixed signal recognition methods, an intelligent recognition method based on cyclic spectral cross section and deep learning is proposed. For common mixed communication signals, the characteristics of zero frequency cross section of cyclic spectrum are theoretically deduced and analyzed. Two new pre-processing methods, nonlinear segmental mapping and directional pseudo-clustering are proposed, which can effectively improve the adaptability and consistency of cross section features. The pre-processed feature graph is combined with the residual network (ResNet), and the deep learning network is used to mine and analyze the deep details of modulation information in the feature graph, and the effective recognition of mixed signals is realized. Simulation results show that the method is insensitive to noise, and the average recognition rate is more than 90% when the SNR is no less than -2dB. The proposed method has good adaptability to the variation of signal parameters and energy ratio between signals.

Keywords: communication signal processing; deep learning; modulation recognition; cyclic spectrum; residual network

收稿日期: 2022-03-19

修回日期: 2022-05-15

基金项目: 军委科技委基础加强计划重点基础研究(2020-JCJQ-ZD-071); 国防科工局稳定支持基金(HTKJ2021KL504011)

第一作者: 杜宇(1987-), 女, 工程师, 硕士, 研究方向为通信信号处理。E-mail: yangwc@cast504.com

0 引言

通信信号调制识别是在未知或已知少量信号先验信息的条件下确定出信号的调制方式, 该技术在军用电子侦察、电磁频谱战及民用频谱监测领域都有广泛的应用。经过多年的发展, 调制识别技术已经形成了较为完备的理论体系。随着电磁环境的愈加复杂, 接收机接收到的不再是单一信号, 而是2个或多个信号的混合形式, 混合信号具有时频域混叠特性, 已有的诸多方法不再适用, 故越来越多的学者开始关注混合信号的调制识别问题^[1-8]。信号的混合必然带来识别特征提取的复杂性, 人工智能深度学习方法在单信号调制识别中的成功应用为这一问题提供了新的思路^[9-14], 一些学者在混合多信号智能识别方面进行了尝试和探索^[15-18]。文献[15]研究了基于深度学习胶囊网络的共信道多信号调制识别方法, 利用了胶囊网络多模式处理及向量输出的优势, 但文献中假设信号共信道不同频, 多个信号在频域可分, 所以严格意义上属于单信号识别范畴。文献[16, 18]分别采用残差神经网络和卷积神经网络来识别共信道时频域混合信号, 其网络输入均为混合信号时域波形信息, 该类方法的优势在于直接采用经典深度学习对信号时域信息进行智能分析识别, 原理简单, 易于操作, 且在训练所设信噪比范围内有较稳定的识别性能, 但由于时域波形易受噪声影响, 所以训练覆盖信噪比以外识别鲁棒性较差。文献[16]在训练时考虑了信号参数的变化, 但2种方法均未考虑信号间能量比的影响, 故此方法适应性和迁移性欠佳。文献[17]提出了基于残差神经网络和频谱特征的混合信号识别方法, 其亮点在于对频谱特征进行了移动和剪切处理, 从一定程度上弱化了信号频率信息变化带来的不确定性, 但识别性能依然会受到码速率、能量比及噪声的影响。总的来说, 现有混合信号智能识别方法没有全面考虑和评估所有干扰因素的影响, 致使现有方法适应性较差。

针对上述问题, 本文提出了基于循环谱零谱频率截面的智能分析识别方法。噪声不具有循环频率, 故循环谱具有对噪声不敏感的特性, 考虑计算成本, 本文选取了循环谱中零谱频率截面作为识别特征域, 有效降低了噪声对识别性能的影响。此外, 本文提出了2种特征增强方法, 非线性分段映射为了规避能量比对识别性能的影响, 而指向性伪聚类则有效规避了信号码速率的影响。基于上述处理结果, 同时利用了残差神经网络优异的多层次细节提取分析能力, 实现了卫星通信中应用较多且较难区分的几种相位调制混合信号的识别。

1 混合信号的循环谱特征

本文针对卫星通信中常用且较难区分的BPSK、QPSK和OQPSK 3种信号, 3种信号在时频域有诸多类似的特征, 其双信号混合形式的调制识别问题, 尤其是同频同速率、能量比不确定情况下的混合, 一直是信号识别领域公认的难题之一^[2-3]。

本文尝试从信号循环谱域解决上述同频同码速率的3种信号的混合识别问题, 主要采用循环谱的零谱频率截面, 本节详细分析了单信号和混合双信号的零谱频率截面特征及其差异性。

1.1 单信号零谱频率截面特征

BPSK、QPSK和OQPSK 3种信号可以用统一的数学表达式来表示:

$$x(t) = c(t)\cos(2\pi f_c t + \varphi_0) - s(t)\sin(2\pi f_c t + \varphi_0) \quad (1)$$

式中: $c(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n q(t - nT - t_0)$; $s(t) = s_n q(t - nT - t_0)$; c_n 和 s_n 都等概率地取 ± 1 ; $q(\cdot)$ 为矩形脉冲; T 为符号周期; $1/T$ 为码速率; f_c 为载波频率; φ_0 为初始相位。

对于BPSK信号, $s(t) = 0$; 对于QPSK信号, 可以用式(1)来表示; 对于OQPSK信号, $c(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n q(t - nT - T/2 - t_0)$ 。3种信号的循环谱零率截面公式为

$$S_B(\alpha) = \begin{cases} \frac{E}{4T} \left[Q\left(-f_c + \frac{\alpha}{2}\right) Q^*\left(-f_c - \frac{\alpha}{2}\right) + Q\left(f_c + \frac{\alpha}{2}\right) Q^*\left(f_c - \frac{\alpha}{2}\right) \right] \exp(-j2\pi\alpha t_0), & \alpha = \frac{n}{T}, n \neq 0 \\ \frac{E}{4T} \left[\exp(j2\varphi_0) Q\left(-f_c + \frac{\alpha}{2}\right) Q^*\left(f_c - \frac{\alpha}{2}\right) + \exp(-j2\varphi_0) Q\left(f_c + \frac{\alpha}{2}\right) Q^*\left(-f_c - \frac{\alpha}{2}\right) \right] \exp(-j2\pi\alpha t_0), & \alpha = \pm 2f_c + \frac{n}{T} \end{cases} \quad (2)$$

$$S_Q(\alpha) = \frac{E}{4T} \left[Q\left(-f_c + \frac{\alpha}{2}\right) Q^*\left(-f_c - \frac{\alpha}{2}\right) + Q\left(f_c + \frac{\alpha}{2}\right) Q^*\left(f_c - \frac{\alpha}{2}\right) \right] \exp(-j2\pi\alpha t_0), \alpha = \frac{n}{T}, n \neq 0 \quad (3)$$

$$S_O(\alpha) = \begin{cases} \frac{E}{4T} \left[Q\left(-f_c + \frac{\alpha}{2}\right) Q^*\left(-f_c - \frac{\alpha}{2}\right) + Q\left(f_c + \frac{\alpha}{2}\right) Q^*\left(f_c - \frac{\alpha}{2}\right) \right] \exp(-j2\pi\alpha t_0), & \alpha = \frac{n}{T}, n(\text{even}, n \neq 0) \\ \frac{E}{4T} \left[\exp(j2\varphi_0) Q\left(-f_c + \frac{\alpha}{2}\right) Q^*\left(f_c - \frac{\alpha}{2}\right) + \exp(-j2\varphi_0) Q\left(f_c + \frac{\alpha}{2}\right) Q^*\left(-f_c - \frac{\alpha}{2}\right) \right] \exp(-j2\pi\alpha t_0), & \alpha = \frac{n}{T} \pm 2f_c, n(\text{odd}) \end{cases} \quad (4)$$

式中： $Q(f) = \frac{\sin(\pi f T)}{\pi f}$ ； n 为整数， $\frac{n}{T}$ 即为整数倍的码元速率； E 为信号能量。特别说明，由于噪声主要存在于 $\alpha=0$ 截面，故此处均屏蔽 $\alpha=0$ 点处特征。

(1) 当 $\alpha = \frac{n}{T}$ ，且 $n \neq 0$ 时，因 $f_c \gg \alpha/2$ ，故

$$S_B(\alpha) = S_Q(\alpha) = S_O(\alpha) \approx 0$$

(2) 当 $\alpha = \pm 2f_c + \frac{n}{T}$ 时，因循环谱具有对称性，

故此处只分析 $\alpha > 0$ 区域， $\alpha < 0$ 区域亦有类似特征。 $NULL!$ 表示此处无有效值。

1) 当 $\alpha = 2f_c$ 时

$$\left| S_B(2f_c) \right| \approx \frac{E}{4T} \left| Q(0) \right|^2 = \frac{TE}{4}$$

$$\left| S_Q(2f_c) \right| = \left| S_O(2f_c) \right| = NULL!$$

2) 当 $\alpha = 2f_c \pm \frac{1}{T}$ 时

$$\left| S_B\left(2f_c \pm \frac{1}{T}\right) \right| = \left| S_O\left(2f_c \pm \frac{1}{T}\right) \right| \approx \frac{E}{4T} \left| Q\left(\frac{1}{2T}\right) \right|^2 \approx \frac{TE}{\pi^2}$$

$$\left| S_Q\left(2f_c \pm \frac{1}{T}\right) \right| = NULL!$$

3) 当 $\alpha = 2f_c \pm \frac{2}{T}$ 时

$$\left| S_B\left(2f_c \pm \frac{2}{T}\right) \right| \approx \frac{E}{4T} \left| Q\left(\frac{1}{T}\right) \right|^2 \approx 0$$

$$\left| S_Q\left(2f_c \pm \frac{2}{T}\right) \right| = \left| S_O\left(2f_c \pm \frac{2}{T}\right) \right| = NULL!$$

4) 当 $\alpha = 2f_c \pm \frac{3}{T}$ 时

$$\left| S_B\left(2f_c \pm \frac{3}{T}\right) \right| = \left| S_O\left(2f_c \pm \frac{3}{T}\right) \right| \approx$$

$$\frac{E}{4T} \left| Q\left(\frac{3}{2T}\right) \right|^2 \approx \frac{TE}{9\pi^2}$$

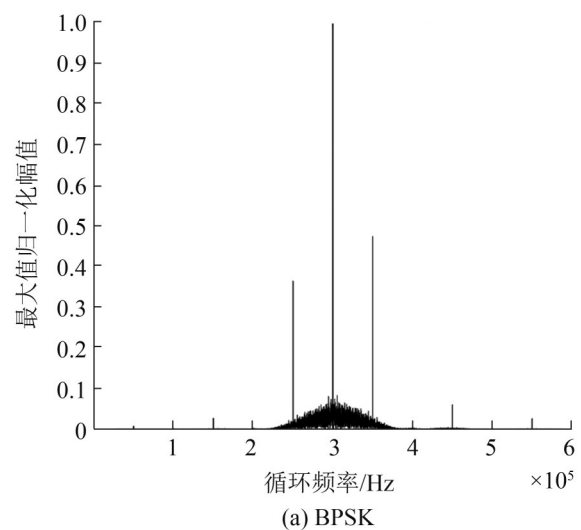
$$\left| S_Q\left(2f_c \pm \frac{3}{T}\right) \right| = NULL!$$

5) 当 $\alpha \geq 2f_c + \frac{4}{T}$ 或 $\alpha \leq 2f_c - \frac{4}{T}$ 时

$$\left| S_B^\alpha(f) \right| = \left| S_O^\alpha(f) \right| \ll \frac{TE}{\pi^2}, \text{可忽略不计}$$

$$\left| S_Q(\alpha) \right| = NULL!$$

上述3种信号的零谱频率截面特征如图1所示。



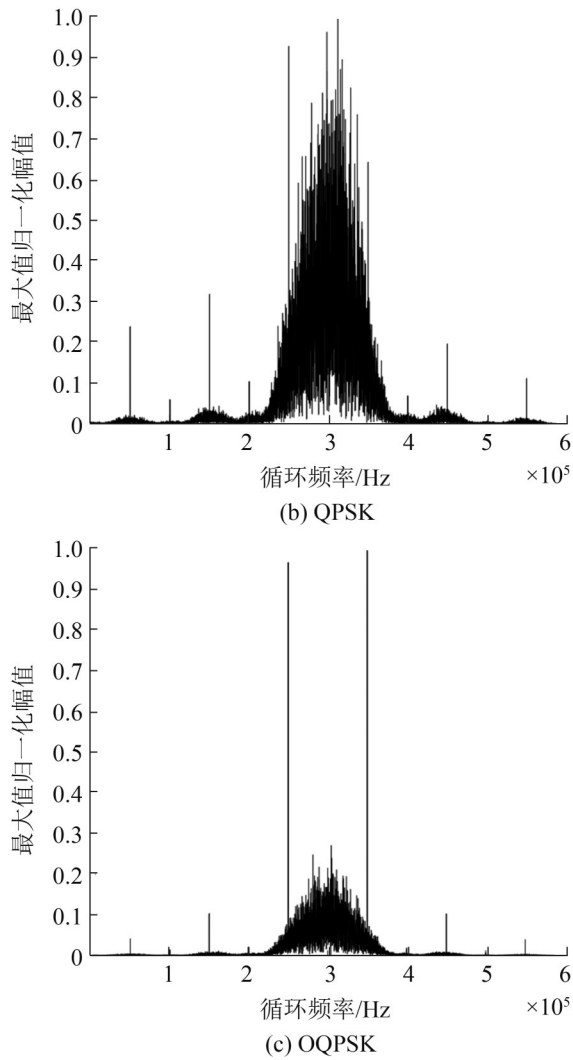


图1 循环谱零谱频率截面特征

Fig. 1 Characteristics of zero frequency cross section of cyclic spectrum

1.2 混合信号零谱频率截面特征

循环谱满足叠加原理, 既如果多个信号之间相互独立, 其混合信号的循环谱可以表示为单个

$$S_{B+Q}(\alpha) =$$

$$\begin{cases} \frac{E_B}{4T_B} \left[Q_B \left(-f_{cB} + \frac{\alpha}{2} \right) Q_B^* \left(-f_{cB} - \frac{\alpha}{2} \right) + Q_B \left(f_{cB} + \frac{\alpha}{2} \right) Q_B^* \left(f_{cB} - \frac{\alpha}{2} \right) \right] \exp(-j2\pi\alpha t_{0B}), \alpha = \frac{n}{T_B}, n \neq 0 \\ \frac{E_Q}{4T_Q} \left[Q_Q \left(-f_{cQ} + \frac{\alpha}{2} \right) Q_Q^* \left(-f_{cQ} - \frac{\alpha}{2} \right) + Q_Q \left(f_{cQ} + \frac{\alpha}{2} \right) Q_Q^* \left(f_{cQ} - \frac{\alpha}{2} \right) \right] \exp(-j2\pi\alpha t_{0Q}), \alpha = \frac{n}{T_Q}, n \neq 0 \\ \frac{E_B}{4T_B} \left[\exp(j2\varphi_{0B}) Q_B \left(-f_{cB} + \frac{\alpha}{2} \right) Q_B^* \left(f_{cB} - \frac{\alpha}{2} \right) + \exp(-j2\varphi_{0B}) Q_B \left(f_{cB} + \frac{\alpha}{2} \right) Q_B^* \left(-f_{cB} - \frac{\alpha}{2} \right) \right] \exp(-j2\pi\alpha t_{0Q}) \\ \alpha = \pm 2f_{cB} + \frac{n}{T_B} \end{cases} \quad (9)$$

信号循环谱的叠加形式。假设2个信号 x_1 和 x_2 相互独立, 其线性混合后循环谱满足:

$$S_{ax_1+bx_2}^\alpha(f) = a^2 S_{x_1}^\alpha(f) + b^2 S_{x_2}^\alpha(f) \quad (5)$$

此外, 信号只有在自身的循环频率处其循环谱值才不为0, 因此, 循环谱具有信号选择性, 或者说循环频率不同的多个信号的混合信号在循环谱上具有可分性。例如, 信号 x_1 和 x_2 的循环频率分别为 α_1 和 α_2 , 那么:

$$\begin{cases} S_{x_1}^{\alpha_2}(f) = 0 \\ S_{x_2}^{\alpha_1}(f) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

考虑2种信号叠加后混合信号的循环谱, 有如下结果:

$$\begin{cases} S_{ax_1+bx_2}^{\alpha_1}(f) = a^2 S_{x_1}^{\alpha_1}(f) + b^2 S_{x_2}^{\alpha_1}(f) = a^2 S_{x_1}^{\alpha_1}(f) \\ S_{ax_1+bx_2}^{\alpha_2}(f) = a^2 S_{x_1}^{\alpha_2}(f) + b^2 S_{x_2}^{\alpha_2}(f) = b^2 S_{x_2}^{\alpha_2}(f) \end{cases} \quad (7)$$

由上述分析可知, 混合信号循环谱为单个信号循环谱的线性累加, 囊括了所有单信号的循环谱分布特征。如果2个信号循环谱具有某个相同的循环频率, 则其混合信号循环谱在该循环频率处的分布为2个信号的叠加, 而在其他循环频率处则独立分布。

针对本文提出的循环谱零谱频率域特征, 亦满足上述叠加性和信号选择性, 既 $f=0$, 式(7)演化为

$$\begin{cases} S_{ax_1+bx_2}(\alpha_1) = a^2 S_{x_1}(\alpha_1) + b^2 S_{x_2}(\alpha_1) = a^2 S_{x_1}(\alpha_1) \\ S_{ax_1+bx_2}(\alpha_2) = a^2 S_{x_1}(\alpha_2) + b^2 S_{x_2}(\alpha_2) = b^2 S_{x_2}(\alpha_2) \end{cases} \quad (8)$$

针对本文研究的同频同码速率的3类混合信号, 结合式(2)~(4)及式(8), 可得信号循环谱零谱频率截面公式为

$$S_{B+O}(\alpha) = \begin{cases} \frac{E_B}{4T_B} \left[Q_B \left(-f_{cB} + \frac{\alpha}{2} \right) Q_B^* \left(-f_{cB} - \frac{\alpha}{2} \right) + Q_B \left(f_{cB} + \frac{\alpha}{2} \right) Q_B^* \left(f_{cB} - \frac{\alpha}{2} \right) \right] \exp(-j2\pi\alpha t_{0B}), \alpha = \frac{n}{T_B}, n \neq 0 \\ \frac{E_O}{4T_O} \left[Q_O \left(-f_{cO} + \frac{\alpha}{2} \right) Q_O^* \left(-f_{cO} - \frac{\alpha}{2} \right) + Q_O \left(f_{cO} + \frac{\alpha}{2} \right) Q_O^* \left(f_{cO} - \frac{\alpha}{2} \right) \right] \exp(-j2\pi\alpha t_{0O}), \alpha = \frac{n}{T_O}, n(\text{even}, n \neq 0) \\ \frac{E_B}{4T_B} \left[\exp(j2\varphi_{0B}) Q_B \left(-f_{cB} + \frac{\alpha}{2} \right) Q_B^* \left(f_{cB} - \frac{\alpha}{2} \right) + \exp(-j2\varphi_{0B}) Q_B \left(f_{cB} + \frac{\alpha}{2} \right) Q_B^* \left(-f_{cB} - \frac{\alpha}{2} \right) \right] \exp(-j2\pi\alpha t_{0B}) \\ \alpha = \pm 2f_{cB} + \frac{n}{T_B} \\ \frac{E_O}{4T_O} \left[\exp(j2\varphi_{0O}) Q_O \left(-f_{cO} + \frac{\alpha}{2} \right) Q_O^* \left(f_{cO} - \frac{\alpha}{2} \right) + \exp(-j2\varphi_{0O}) Q_O \left(f_{cO} + \frac{\alpha}{2} \right) Q_O^* \left(-f_{cO} - \frac{\alpha}{2} \right) \right] \exp(-j2\pi\alpha t_{0O}) \\ \alpha = \pm 2f_{cO} + \frac{n}{T_O}, n(\text{odd}) \end{cases} \quad (10)$$

$$S_{Q+O}(\alpha) = \begin{cases} \frac{E_O}{4T_O} \left[Q_O \left(-f_{cO} + \frac{\alpha}{2} \right) Q_O^* \left(-f_{cO} - \frac{\alpha}{2} \right) + Q_O \left(f_{cO} + \frac{\alpha}{2} \right) Q_O^* \left(f_{cO} - \frac{\alpha}{2} \right) \right] \exp(-j2\pi\alpha t_{0O}), \alpha = \frac{n}{T_O}, n(\text{even}, n \neq 0) \\ \frac{E_Q}{4T_Q} \left[Q_Q \left(-f_{cQ} + \frac{\alpha}{2} \right) Q_Q^* \left(-f_{cQ} - \frac{\alpha}{2} \right) + Q_Q \left(f_{cQ} + \frac{\alpha}{2} \right) Q_Q^* \left(f_{cQ} - \frac{\alpha}{2} \right) \right] \exp(-j2\pi\alpha t_{0Q}), \alpha = \frac{n}{T_Q}, n \neq 0 \\ \frac{E_O}{4T_O} \left[\exp(j2\varphi_{0O}) Q_O \left(-f_{cO} + \frac{\alpha}{2} \right) Q_O^* \left(f_{cO} - \frac{\alpha}{2} \right) + \exp(-j2\varphi_{0O}) Q_O \left(f_{cO} + \frac{\alpha}{2} \right) Q_O^* \left(-f_{cO} - \frac{\alpha}{2} \right) \right] \exp(-j2\pi\alpha t_{0O}) \\ \alpha = \pm 2f_{cO} + \frac{n}{T_O}, n(\text{odd}) \end{cases} \quad (11)$$

式(9)~(11)中变量下标符号 B、Q、O 分别代表 BPSK、QPSK 和 OQPSK 信号，对于本文研究的同频同速率混合信号， $f_{cB}=f_{cQ}=f_{cO}$ ， $T_B=T_Q=T_O$ ， $Q_B=Q_Q=Q_O$ 。混合信号零谱频率截面见图 2，图中信号能量相等。

零谱频率截面可看成循环谱中的特殊切片，故其亦满足叠加性和信号选择性。由图 1 及图 2 可以看出，混合信号在零谱频率截面的谱线分布为单信号的谱线分布的线性累加，包含了所有信号的有效特征。

以图 2(b)BPSK+OQPSK 为例，BPSK 在循环频率 $2f_c$ (300 kHz)和 $2f_c \pm 1/T$ 处有明显的谱线分布，OQPSK 在循环频率 $2f_c \pm 1/T$ 处有明显的谱线分布，则其混合信号在循环频率 $2f_c$ 和 $2f_c \pm 1/T$ 均有

明显的谱线分布，且在 $2f_c \pm 1/T$ 处进行了累加。

在同频同速率的混合信号调制识别中，信号间能量比是影响识别效果的一个关键因素，因此，根据 1.1 节中信号循环谱理论值，本节对混合信号间能量比为 1:1、1:4、4:1 时的循环谱特征进行了理论分析，该部分可看成是信号间能量比从 1:1~1:4 或 1:1~4:1 的一个概括性分析；当能量比超出 1:4 或 4:1 时，能量大的信号受影响较小，可看做单信号，此种情况不在本文讨论范围，此处不再赘述，详见表 1。

表 1 中 E_B 、 E_Q 、 E_O 分别表示混合信号中 BPSK、QPSK、OQPSK 信号的能量，本文研究同频同码速率的混合信号识别，故 α 、 f_c 、 T 表示 3 种信号统一的循环频率、载频和码元周期，其中 $1/T$ 即为码速率。

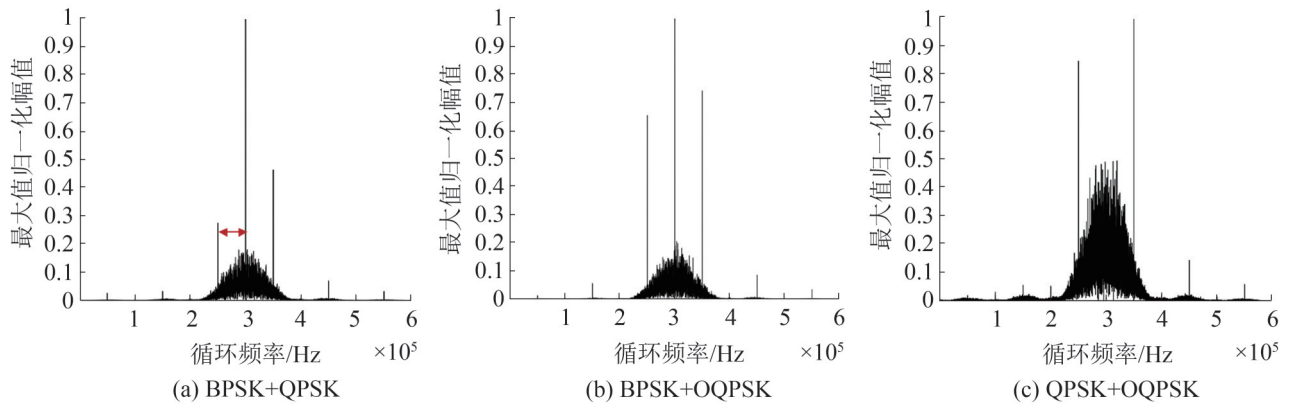


图 2 混合信号零谱频率截面特征

Fig. 2 Characteristics of zero frequency crosssection of mixed signals

表 1 混合信号不同频点循环谱理论值

Table 1 Theoretical values of cyclic spectrum at different frequency points of mixed signals

序号	循环频率	类型	BPSK+QPSK		BPSK+OQPSK			QPSK+OQPSK			
		理论值	0		0			0			
1	$\alpha = \frac{n}{T}$	最大值归一化幅值	$E_B:E_Q$	1:1	0	$E_B:E_O$	1:1	0	$E_Q:E_O$	1:1	0
				1:4	0	$E_B:E_O$	1:4	0	$E_Q:E_O$	1:4	0
				4:1	0	$E_B:E_O$	4:1	0	$E_Q:E_O$	4:1	0
		理论值	$TE_B/4$		$TE_B/4$			0			
2	$\alpha = 2f_c$	最大值归一化幅值	$E_B:E_Q$	1:1	1.00	$E_B:E_O$	1:1	1.00	$E_Q:E_O$	1:1	0
				1:4	1.00	$E_B:E_O$	1:4	0.49	$E_Q:E_O$	1:4	0
				4:1	1.00	$E_B:E_O$	4:1	1.00	$E_Q:E_O$	4:1	0
		理论值	TE_B/π^2		$TE_B/\pi^2 + TE_O/\pi^2$			TE_O/π^2			
3	$\alpha = 2f_c \pm \frac{1}{T}$	最大值归一化幅值	$E_B:E_Q$	1:1	0.41	$E_B:E_O$	1:1	0.81	$E_Q:E_O$	1:1	1.00
				1:4	0.41	$E_B:E_O$	1:4	1.00	$E_Q:E_O$	1:4	1.00
				4:1	0.41	$E_B:E_O$	4:1	0.51	$E_Q:E_O$	4:1	1.00
		理论值	0		0			—			
4	$\alpha = 2f_c \pm \frac{2}{T}$	最大值归一化幅值	$E_B:E_Q$	1:1	0	$E_B:E_O$	1:1	0	$E_Q:E_O$	1:1	—
				1:4	0	$E_B:E_O$	1:4	0	$E_Q:E_O$	1:4	—
				4:1	0	$E_B:E_O$	4:1	0	$E_Q:E_O$	4:1	—
		理论值	$TE_B/9\pi^2$		$TE_B/9\pi^2 + TE_O/9\pi^2$			$TE_O/9\pi^2$			
5	$\alpha = 2f_c \pm \frac{3}{T}$	最大值归一化幅值	$E_B:E_Q$	1:1	0.05	$E_B:E_O$	1:1	0.10	$E_Q:E_O$	1:1	0.11
				1:4	0.10	$E_B:E_O$	1:4	0.14	$E_Q:E_O$	1:4	0.10
				4:1	0.05	$E_B:E_O$	4:1	0.06	$E_Q:E_O$	4:1	0.11
		理论值	0		0			0			
6	$\alpha \geq 2f_c + \frac{4}{T}$ $\alpha \leq 2f_c - \frac{4}{T}$	最大值归一化幅值	$E_B:E_Q$	1:1	0	$E_B:E_O$	1:1	0	$E_Q:E_O$	1:1	0
				1:4	0	$E_B:E_O$	1:4	0	$E_Q:E_O$	1:4	0
				4:1	0	$E_B:E_O$	4:1	0	$E_Q:E_O$	4:1	0

由图 2 及表 1 可知, 3 类混合信号循环谱零谱频率截面有明显的谱线分布差异, 说明该截面是

一种有效的分类特征, 可用于混合信号调制方式的识别。

2 特征增强与分类

由混合信号循环谱截面及表 1 可以看出，有效识别特征存在于某一类频率处，而图 2 中的特征显得杂乱无章，存在较多的冗余信息，且不同能量比的混合信号特征值存在差异。在实际电子侦察中，接收机为固定中频接收，即将未知信号通过多次变频变换到固定中频，故在后端信号处理时，信号载频固定，即 f_c 不变，根据循环谱截面公式，除了载频外，码速率、信号初始相位、信号能量比是影响混合信号识别特征的因素，信号初始相位在循环谱取模计算中已消除，则码速率和信号能量比成为影响混合信号循环谱零谱频率特征的唯一因素。为了增强图像特征的可读性和一致性，消除信噪比对图像特征的影响，此处提出了一种新的非线性分段映射方法对图像进行预处理。此外，为了增强识别特征域对码速率(如图 2(a)中红色双箭头所示)变化的适应性，此处提出了指向性伪聚类方法来降低码速率变化的影响。针对特征增强后的二维图，采用残差神经网络进行特征提取和分类，间接达到信号调制识

别的目的。

2.1 非线性分段映射

非线性分段映射的目的是为了使不同能量比的信号特征趋于一致性，同时降低后续识别网络计算开销，提高识别网络效能。对于循环谱零谱频率截面，非线性分段映射方法遵循以下原则：

```

if ( $S \geq 0.45$ )
     $S' = 1$ ;
else if ( $S \geq 0.2$ ) && ( $S < 0.45$ )
     $S' = 0.5$ ;
else if ( $S \geq 0.05$ ) && ( $S < 0.2$ )
     $S' = 0.2$ ;
else
     $S' = 0$ ;
end
    
```

上述映射中， S 表示原归一化循环谱值， S' 表示映射后谱值，&& 表示“与”操作。以 BPSK+OQPSK 混合信号为例，图 3 给出了其在不同能量比下经非线性分段映射处理后结果，可以看出，信号能量比导致的差异性特征得到了明显弱化。

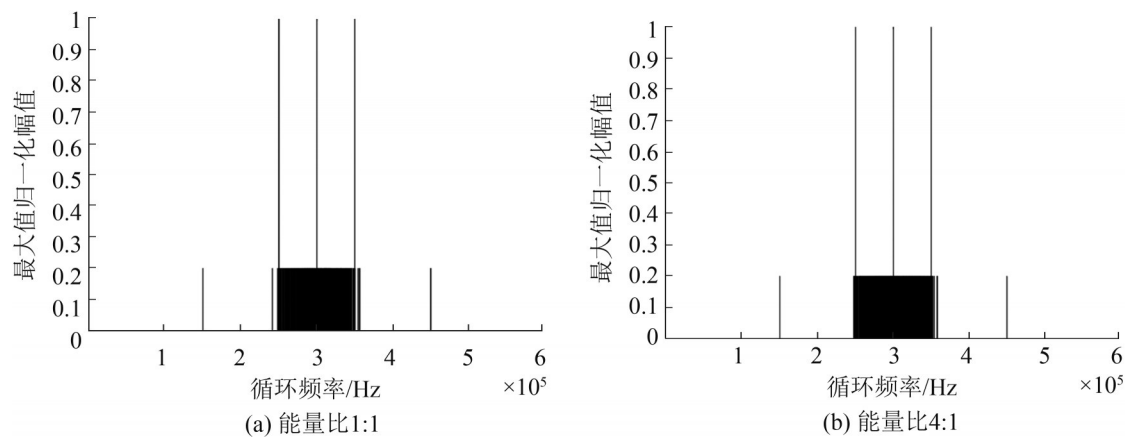


图 3 BPSK+OQPSK 信号循环谱截面分段映射示意图
Fig. 3 Sectional mapping of cyclic spectrum section of mixed signals BPSK+OQPSK

2.2 指向性伪聚类

指向性伪聚类的目的是消除因为码速率带来的谱线间隔，因其借鉴了聚类的思想，但同时又有方向性要求(指向二倍载频对应点)，故称为指向性伪聚

类。假设非线性分段映射后循环谱截面用 $S'(n)$ 表示，指向性伪聚类处理后其截面特征图用 $S''(n)$ 表示，其中 $n=1, 2, \dots, N$ 。载频已知，假设二倍载频对应截面中 m 点，其指向性伪聚类处理流程如图 4 所示。

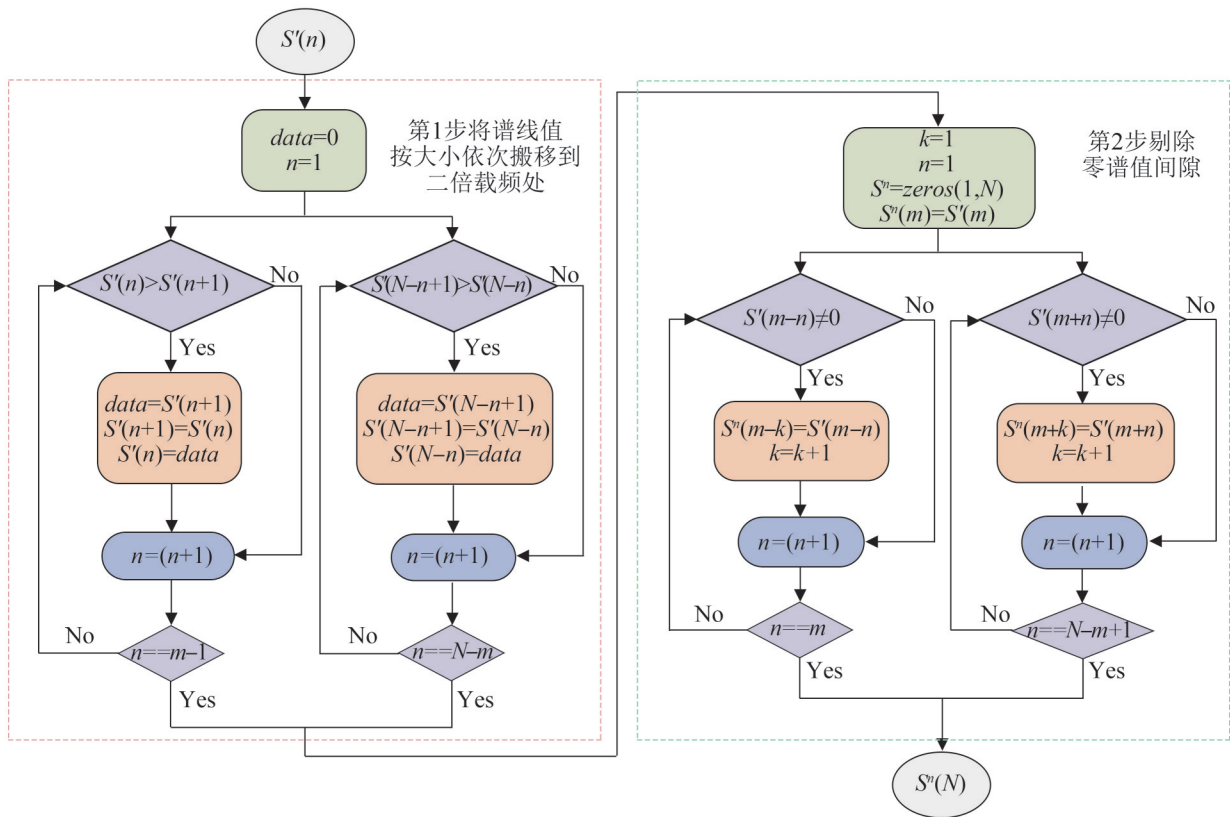


图4 指向性伪聚类方法处理流程
Fig. 4 Processing flow of directional pseudo-cluster method

以图3(a)BPSK+OQPSK为例, 图4所属处理过程如图5所示, 右侧图即为指向性伪聚类后结果。由图可知, 图3(a)中所有谱线均向二倍载频循环频率方向汇聚, 消除了码速率带来的谱线间隔, 故此特征图不受码速率变化的影响, 可用于混合信号的有效识别。

由图5及上述分析可以看出, 混合信号调制

识别已由一维信号分类演化为二维图像识别问题, 为了更直观的说明混合信号循环谱截面二维增强图像差异, 图6给出了3类混合信号的识别特征图。由图可以看出, 3类信号特征图增强后亦有明显的差异, 是有效的识别特征, 但图中谱细节纷繁复杂, 传统的特征提取方法很难覆盖全面, 深度学习中的残差网络提供了一个很好的思路。

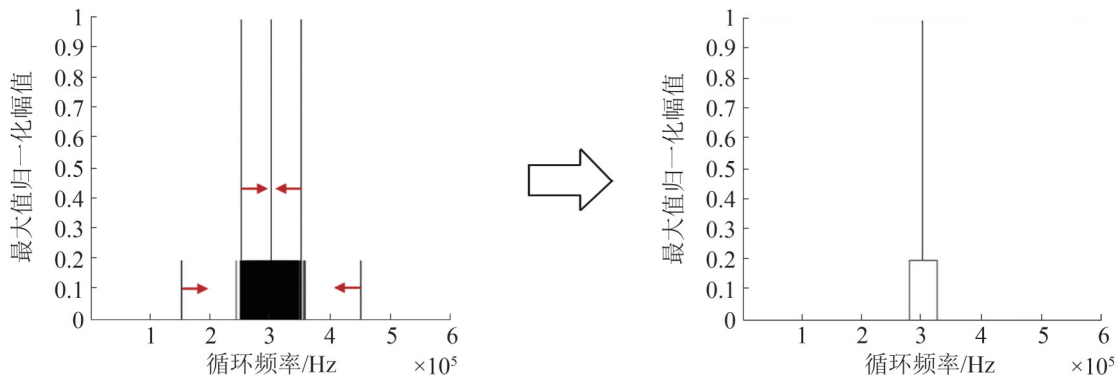


图5 指向性伪聚类处理示意图
Fig. 5 Schematic diagram of directional pseudo-cluster processing

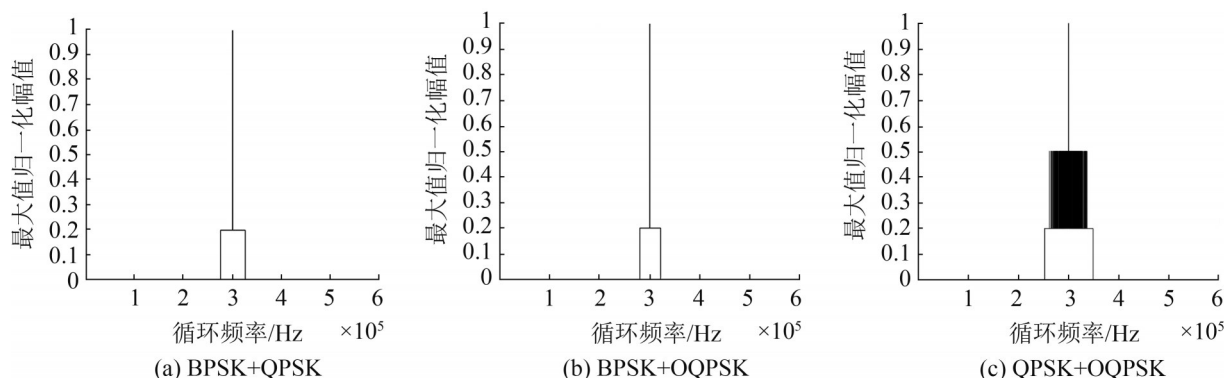


图 6 循环谱截面二维增强图像
Fig. 6 Two-dimensional enhanced images of cyclic spectrum section

2.3 深度残差网络分类

深度残差网络(residual neural network, ResNet)是 2015 年提出的一种网络结构,指的是在传统卷积神经网络中加入残差学习的思想,解决了深层网络中梯度弥散和精度下降(训练集)的问题,使网络能够越来越深,保证精度的同时控制了速度。该型网络更易优化,且可通过增加网络深度的方式提取更多的特征,进而提升模型的准确率和细节特征提取效能。

经过几年发展,ResNet 衍生出了 ResNet50、ResNet101 等多种不同卷积层深度的网络结构。本文采用 ResNet50 网络结构^[17],该网络主要由多个残差模块构成,其结构如图 7 所示。ResNet50 网络结构包括 1 个全连接层和 49 个卷积层,网络模型运行分 6 个阶段进行。其中,第 1 阶段包含卷积、批量正则化、激活函数和最大池化操作;第 2~5 阶段包含卷积残差模块和恒等残差模块;第 6 阶段则包含全局平均池化层操作及全连接层的 softmax 分类器。

本文中残差网络分类为一种有监督学习方式,图 7 中网络输入即为如图 6 所示的 3 类混合信号循环谱零谱频率特征增强后二维图,二维图经过残差网络多阶段卷积和池化操作,最后网络根据其特征进行了非线性调制方式类别映射,输出为对应的 3 类混合信号调制方式。

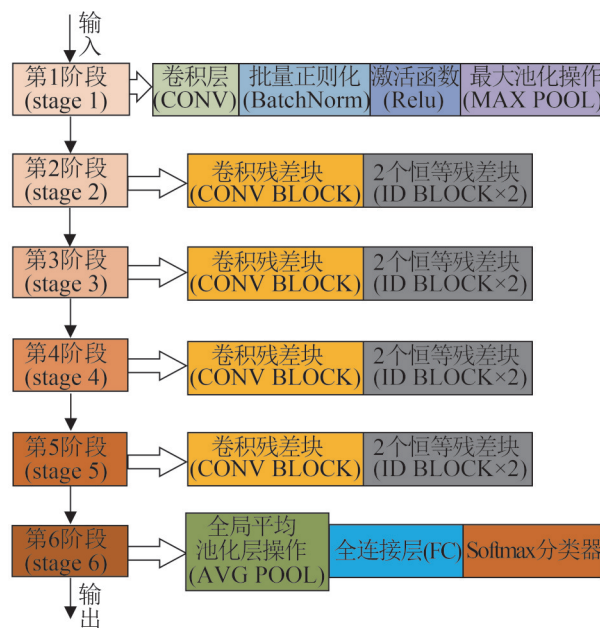


图 7 ResNet50 网络结构图
Fig. 7 Structure diagram of ResNet50 network

3 仿真实验与分析

为了验证所提方法的有效性,基于 Matlab 软件平台和惠普 Z840 工作站进行了仿真评估。信号参数均为:中频 150 kHz,码速率 50 kbit/s,采样频率 1.2 MHz。训练样本为无噪声情况下,且能量比 1:1 时,每类混合形式增强后特征图 1 000 幅,共 3 000 个样本,采用 2.3 节所述深度学习网络进行特征分析识别。分别从噪声、码速率、能量比以及以往相关算法性能 4 方面比较,对所提方法进

行评估分析。

3.1 噪声对方法性能的影响分析

为了更清晰具体了解识别情况,对每类混合信号进行了噪声影响仿真分析,噪声为加性高斯白噪声,测试中,混合信号能量比1:1,取每类混合信号在[-5 dB, 15 dB]区间每个信噪比下200幅特征图,共计12 600组数据作为测试样本。测试结果如图8所示。

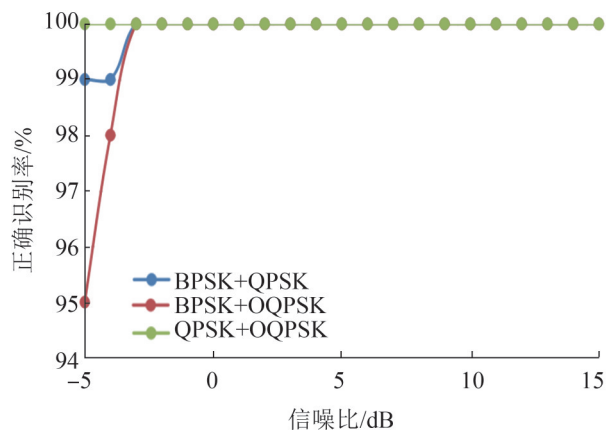


图8 不同信噪比下识别结果
Fig. 8 Recognition results under different SNR

由图8可以看出,整体而言,在测试信噪比范围内,当信噪比不小于-5 dB时,识别率均大于95%;从单个混合信号角度来看,上述3种混合信号中,QPSK+OQPSK信号识别性能明显优于其他信号,因为此种混合信号能量相同时特征图经增强处理后个体特征最为明显。其次,训练样本无噪声,说明该方法有较好的泛化能力和噪声抑制能力。

3.2 能量比对方法性能的影响分析

对于混合信号而言,不同的能量比可导致其混合特征呈现不同的特性,所以能量比是影响混合信号识别的最主要因素,本节考察不同能量比对本文方法的影响。在3.1节测试样本的基础上,增加能量比为1:2、2:1、1:3、3:1、1:4、4:1情况下的测试,样本其他参数同3.1节,样本共计75 600个。平均识别结果如图9所示。

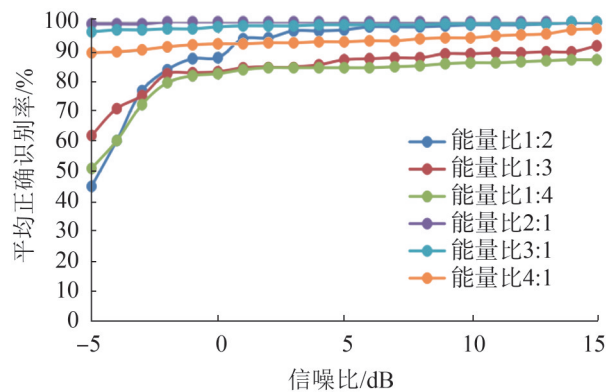


图9 不同能量比识别结果
Fig. 9 Recognition results of different energy ratios

由图9可知,能量比不同时,3类混合形式信号平均识别率略有差异,能量比2:1、3:1、4:1平均识别率整体优于能量比1:2、1:3、1:4,这是由于BPSK单信号个体特征明显,前者中BPSK整体拉升了识别率,后者BPSK能量占比较小,平均识别率较差;整体而言,当信噪比大于-2 dB时,6种能量比情况的平均识别率大于90%。说明算法特征增强中非线性分段映射在一定程度上弱化了能量比的影响,有效提升了算法的适应性。

3.3 码元速率对方法性能的影响分析

在信号接收过程中,射频信号经接收机下变频到固定中频,那么信号的码速率就成为影响调制识别性能的主要因素之一,本节分析不同信号码速率对方法的影响。上述仿真中码速率为50 kbit/s,此处增加了码速率为60 kbit/s时的仿真测试,混合信号样本其他参数同3.1节,结果如图10所示。

由图10可知,识别性能与3.1节结果大致相当,说明本文方法对码速率变换不敏感,也间接证明了特征增强中指向性伪聚类方法的有效性,方法具有较好的鲁棒性和适应性。

3.4 与已有方法的性能比较

为了对方法有一个较为全面的评估,本节对本文方法和文献[16-17]进行了比较分析。采用本文训练样本对文献[16-17]中所提方法进行了训练,测试样本囊括了3.1~3.3节所有样本,图11给出了

3类混合形式3种方法的平均识别结果。

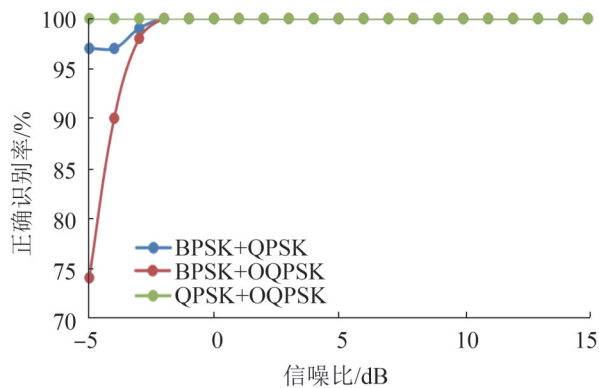


图10 码速率 60 bit/s 识别结果

Fig. 10 Recognition results of 60 bit/s symbol rates

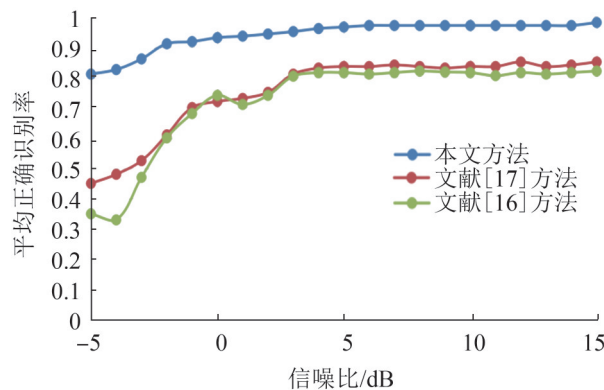


图11 不同方法识别结果

Fig. 11 Recognition results of different methods

由图11可知, 本文方法在整个信噪比区间内识别结果远优于文献[16-17]。3种方都用到了深度学习残差网络, 说明本文的特征域及特征增强方法起到了关键的作用, 本文方法有更好的识别性能和适应性。

4 结论

本文基于循环谱零谱频率截面对噪声不敏感的特性, 构建了混合信号识别特征域, 并提出了2种新方法, 即非线性分段映射和指向性伪聚类, 从不同维度对该特征域进行了增强处理, 在此基础上, 采用ResNet50神经网络对该特征域进行了深层次智能化特征分析和分类, 有效实现了卫星通信中3类常见混合形式信号的有效识别, 仿真

结果证明了该方法的有效性。此外, 从循环谱零谱频率截面的公式可以看出, 无复杂计算模块, 计算量小, 且ResNet50网络模型成熟, 已广泛应用, 故本文方法易于工程实现。

参考文献:

- [1] 林冲, 闫文君, 张立民, 等. 通信信号调制识别综述[J]. 中国电子科学研究院学报, 2021, 16(11): 1074-1085.
Lin Chong, Yan Wenjun, Zhang Limin, et al. An Overview of Communication Signals Modulation Recognition[J]. Journal of CAEIT, 2021, 16(11): 1074-1085.
- [2] 赵宇峰, 曹玉健, 纪勇, 等. 基于循环频率特征的单信道混合通信信号的调制识别[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(5): 1202-1208.
Zhao Yufeng, Cao Yujian, Ji Yong, et al. Modulation Identification for Single-Channel Mixed Communication Signals Based on Cyclic Frequency Features[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(5): 1202-1208.
- [3] 张洋, 彭华. 单通道混合信号调制识别[J]. 信息工程大学学报, 2016, 17(6): 662-668, 712.
Zhang Yang, Peng hua. Modulation Recognition for Mixed Signals in Single Channniel[J]. Journal of Information Engineering University, 2016, 17(6): 662-668, 712.
- [4] 曾创展, 贾鑫. 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[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(5): 172-176.
Zeng Chuangzhan, Jia Xin. A Modulation Recognition Method for Time-Frequency Overlapped MPSK Signals in the Single Channel[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(5): 172-176.
- [5] 陈思南, 龚晓峰, 安冬冬. 利用高阶累积量的时频重叠MPSK信号调制识别[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(36): 195-199.
Chen Sinan, Gong Xiaofeng, An Dongdong. Modulation Identification of Time-Frequency Overlapped MPSK Signal Using High Order Cumulant[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(36): 195-199.
- [6] Huang S, Yao Y, Wei Z, et al. Automatic Modulation Classification of Overlapped Sources Using Multiple Cumulants[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology (S0018-9545), 2017, 66(7): 6089-6101.
- [7] 陈思南, 龚晓峰, 陈利波. 共信道时频重叠的数字信号调制识别方法[J]. 计算机工程与设计, 2018, 39(3): 612-616, 622.
Chen Sinan, Gong Xiaofeng, Chen Libo. Method of Digital Signal Modulation Recognition Based on Co-channel Time-Frequency Overlap[J]. Computer Engineering and Design,

- 2018, 39(3): 612-616, 622.
- [8] 吴娟, 谢跃雷. 基于分数阶小波变换的OFDM混合信号识别方法[J]. 电视技术, 2020, 44(11): 29-37.
Wu Juan, Xie Yuelei. Recognition Method of OFDM Mixed Signal Based on Fractional Wavelet Transform[J]. Video Engineering, 2020, 44(11): 29-37.
- [9] 张承畅, 余洒, 徐余, 等. 神经网络在调制识别中的应用综述[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2022, 34(2): 181-192.
Zhang Chengchang, Yu Sa, Xu Yu, et al. Survey of Artificial Neural Network Applied to Modulation Recognition[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2022, 34(2): 181-192.
- [10] 郭业才, 姚文强. 基于信噪比分类网络的调制信号分类识别算法[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(10): 3507-3515.
Guo Yecai, Yao Wenqiang. Modulation Signal Classification and Recognition Algorithm Based on Signal to Noise Ratio Classification Network[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(10): 3507-3515.
- [11] Ahmed K A, Ergun E. Automatic Modulation Classification Using Different Neural Network and PCA Combinations[EB/OL]. [2021-12-28]. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114931>.
- [12] Peng Shengliang, Sun Shujun, Yao Yudong. A Survey of Modulation Classification Using Deep Learning: Signal Representation and Data Preprocessing[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems (S1045-9227), 2021, 99: 1-19.
- [13] 郭业才, 张浩然. 基于改进LDA和自编码器的调制识别算法[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(2): 494-500.
Guo Yecai, Zhang Haoran. Modulation Recognition Algorithm Based on Improved LDA and Autoencoders [J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(2): 494-500.
- [14] 郭业才, 王庆伟. 基于截断迁移与并行残差网络的调制识别算法[J/OL]. 系统仿真学报[2021-12-28]. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0282>.
Guo Yecai, Wang Qingwei. Modulation Recognition Algorithm Based on Truncated Migration and Parallel ResNet[J/OL]. Journal of System Simulation[2021-12-28]. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0282>.
- [15] Zhou S Y, Wu Z L, Yin Z D, et al. Blind Modulation Classification for Overlapped Co-channel Signals Using Capsule Networks[J]. IEEE Communications Letters (S1089-7798), 2019, 23(10): 1849-1852.
- [16] 董聪, 张传武, 高勇. 基于残差神经网络的通信混合信号识别[J]. 无线电工程, 2020, 50(9): 727-731.
Dong Cong, Zhang Chuanwu, Gao Yong. Mixed Communication Signal Recognition Based on Residual Neural Network[J]. Radio Engineering, 2020, 50(9): 727-731.
- [17] Wang L J, Han Y, Ge H F, et al. Modulation Recognition of Composite Signal Based on ResNet and Frequency Domain Graph[C]// 2021 3rd International Conference on Artificial Intelligence and Computer Science (AICS). Beijing, 2021: 1-11.
- [18] Yin Z D, Zhang R, Wu Z L, et al. Co-channel Multi-signal Modulation Classification Based on Convolution Neural Network[C]// 2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference. Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2019: 1-5.