

基于特征融合的 DCSK 调制方式识别技术

隋涛^a, 李笑^a, 于其豪^b, 金大凯^a

(沈阳理工大学 a. 自动化与电气工程学院, b. 信息科学与工程学院, 沈阳 110159)

摘要: 差分混沌移位键控(differential chaos shift keying, DCSK)系统由于采用了类噪声的混沌信号作为载波信号,在保密通信中具有广阔的应用前景。开展 DCSK 调制方式识别技术研究有利于军用通信系统信号的认知和分选,为此提出基于特征融合的 DCSK 调制方式识别技术。该技术从统计域、时域、频域对改进的 DCSK 调制信号进行特征提取并分析,根据提取的特征维度建立数据模型,由数据模型与相应的评价因素权重向量确定改进 DCSK 调制信号的阈值,从而实现 DCSK 调制方式的识别。Matlab 仿真实验结果表明该模型具有有效性和准确性。

关键词: 差分混沌移位键控;特征提取;特征融合;调制方式识别

中图分类号: TN918 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1251.2024.03.004

DCSK Modulation Mode Recognition Technology Based on Feature Fusion

SUI Tao, LI Xiao, YU Qihao, JIN Dakai

(Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: Differential chaos shift keying (DCSK) system has a broad application prospect in classified communication due to the use of noise-like chaotic signals as carrier signals. Carrying out the research on DCSK modulation mode recognition technology is beneficial to the cognition and sorting of signals in military communication systems, and for this reason, a DCSK modulation mode recognition technology based on feature fusion is proposed. The technology extracts and analyzes the features of the improved DCSK modulation signal from the statistical, temporal and frequency domains, establishes a data model based on the extracted feature dimensions, and determines the range of the improved DCSK modulation signal from the data model with the corresponding evaluation factor weight vectors to recognize the DCSK modulation mode. The validity and accuracy of the model are verified by Matlab simulation experiments.

Key words: differential chaos shift keying; feature extraction; feature fusion; modulation mode recognition

差分混沌移位键控(differential chaos shift keying, DCSK)调制是一种利用混沌信号的特性进行数据传输的数字通信技术,由于混沌序列不可预测,因此 DCSK 调制具有较强的抗干扰能力和

保密性。信号调制方式识别技术是确保信号在通信系统中安全可靠通信的关键技术之一,在民用和军事通信领域都发挥着重要的作用^[1]。

针对信号检测技术,许多学者提出了一些新

方法。为减少信号处理的工作量,文献[2]在瞬时幅度提取算法的基础上,提出一种调制方式自动识别算法。文献[3]提出一种基于信号瞬时特性并结合决策论对多进制幅移键控、多进制频移键控、多进制相移键控等信号调制方式进行识别的方法,该方法在信噪比较低时也具有较高的识别正确率和更快的识别速度,更容易工程实现。在面对小样本、低信噪比的情况下,文献[4]采用四阶累积量的提取方式对多种数字调制信号进行识别,提高了识别率。为提高低信噪比下的识别性能,文献[5]提出了一种结合高阶累积量和小波变换提取瞬态特征的新方法,并通过神经网络分类器对调制信号进行识别,该方法只选取了三个关键特征,大大降低了算法的复杂度。文献[6]在未知先验条件的情况下,将两种累积量结合起来识别不同的信号调制方式。党月芳等^[7]将高阶累积量和分形盒维数相结合作为特征参数,不仅减少计算的复杂程度,还大大改善了抗噪声的性能。赵雄文等^[8]利用高阶累积量和循环谱结合的方法对信号调制方式进行识别。张笑宇等^[9]引入分数阶傅里叶变换(FRFT)提取修正分数域瞬时幅度参数RMAX进行幅度信号的识别,并提取修正分数域四阶累积量比值进行频率信号的识别及类内信号的识别,完成分数域数字信号的调制方式识别。张秀香等^[10]首先利用小波变换对调制信号进行特征提取,其次利用训练数据样本构建识别分类模型,最后通过测试数据样本测试识别模型的性能。肖子谦^[11]根据实际信号条件和硬件环境提出了基于高阶累积量与高次谱特征的调制识别方法。薛德鑫等^[12]通过信号处理算法对非协作信号进行特征参数提取,从而对多种模拟调制信号及数字调制信号进行识别。

本文利用 Matlab 对 DCSK、调频 - DCSK (frequency modulation-DCSK, FM-DCSK)、短参考 - DCSK (short reference-DCSK, SR-DCSK)、正交双倍速 - DCSK (orthogonal double bit rate-DCSK, ODBR-DCSK) 四种混沌调制信号进行特征提取与分析,在此基础上建立基于特征融合并结合综合评价的 DCSK 调制方式识别技术。

1 混沌信号机理分析

假设接收端信号的表达式为

$$r_{k,i} = S_{k,i} + n_{k,i} \quad (1)$$

式中: $r_{k,i}$ 表示接收端第*i*帧接收第*k*个混沌信号;

$n_{k,i}$ 表示第*i*帧信号中第*k*个混沌信号经过信道时的高斯白噪声; $S_{k,i}$ 表示发射端产生的第*i*帧信号中的第*k*个调制信号。

DCSK 采用传输参考的模式,每帧信号都用长度为 β 的两段信号表示,前半段是参考信号,后半段是信息信号。DCSK 发射端的信号表达式为^[13-14]

$$S_{k,i} = \begin{cases} x_{k,i}, & 0 < k \leq \beta \\ b_{k,i}x_{k-\beta,i}, & \beta < k \leq 2\beta \end{cases} \quad (2)$$

式中: $x_{k,i}$ 表示第*i*帧信号中第*k*个作为参考信号的混沌信号; $b_{k,i}$ 表示第*i*帧信号要传输的第*k*个数据信息; $x_{k-\beta,i}$ 表示第*i*帧信号中第*k*个延时 β 后的混沌信号。

SR-DCSK 将参考信号的长度缩短为*R*,用*P*个长度为*R*的参考信号串联样本传输信息数据,因此信息信号的长度 $\beta = PR$ 。SR-DCSK 发射端的信号表达式为^[14]

$$S_{k,i} = \begin{cases} x_{k,i}, & 0 \leq k < R \\ b_{k,i}x_{k-R,i}, & R \leq k \leq (1+P)R, \\ x_{k-R,i} \equiv x_{0,i} \pmod{R} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $x_{k-R,i}$ 表示第*i*帧信号中第*k*个延时*R*后的混沌信号; $x_{k-R,i} \equiv x_{0,i} \pmod{R}$ 表示 $x_{k-R,i}$ 与 $x_{0,i}$ 对模*R*同余。

FM-DCSK 是在 DCSK 的基础上,加了一个 FM 调频器,对基带混沌信号进行频率调制,并使用该调频混沌信号 $x'_{k,i}$ 作为载波以取代 DCSK 中的混沌信号。FM-DCSK 发射端的信号表达式为^[15]

$$S_{k,i} = \begin{cases} x'_{k,i}, & 0 < k \leq \beta \\ b_{k,i}x'_{k-\beta,i}, & \beta < k \leq 2\beta \end{cases} \quad (4)$$

式中 $x'_{k-\beta,i}$ 表示第*i*帧信号中第*k*个延时 β 后的混沌信号。

ODBR-DCSK 中每帧信号同样被划分为两个相等的时隙,前半段用来传输参考信号,后半段用来传输信息信号。ODBR-DCSK 发射端的信号表达式为^[16]

$$S_i = \begin{cases} x'_{k,i}, & 0 < k \leq \beta \\ \mathbf{a}_{k,i}x'_{k-\beta,i} + \mathbf{b}_{k,i}x''_{k-\beta,i}, & \beta < k \leq 2\beta \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{a}_{k,i}x'_{k-\beta,i} + \mathbf{b}_{k,i}x''_{k-\beta,i}$ 表示第*i*帧信息信号; $x''_{k-\beta,i}$ 是 $x'_{k-\beta,i}$ 经过正交发生器正交后的信号。

2 信号特征分析

为了有效识别 DCSK、SR-DCSK、FM-DCSK、

ODBR-DCSK 四种调制方式,首先采用半扩频因子为 100、混沌初值为 0.4 的 Sine 映射搭建四种调制方式的仿真系统,生成信号样本,图 1 所示为

四种调制信号的时域波形图。其次,对四种调制信号从统计域、部分和频域进行特征提取,部分特征描述如下。

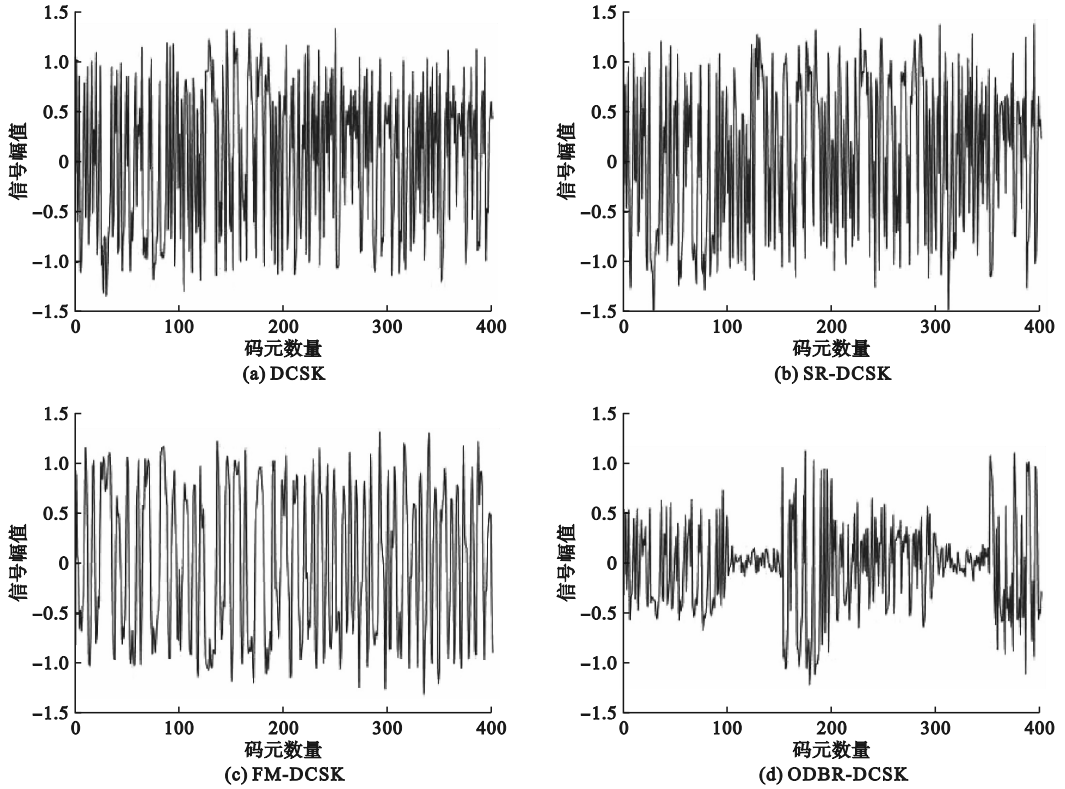


图 1 调制信号时域波形图

Fig. 1 Modulated signal time domain waveform plot

2.1 基于统计域的特征分析

2.1.1 标准差

DCSK、SR-DCSK、FM-DCSK、ODBR-DCSK 四种调制信号的标准差特征如图 2 所示。由图可知,DCSK、FM-DCSK、SR-DCSK 调制信号的标准差大于 ODBR-DCSK 调制信号,即 DCSK、FM-DCSK、SR-DCSK 调制信号相对于 ODBR-DCSK 调制信号而言,呈分散分布。

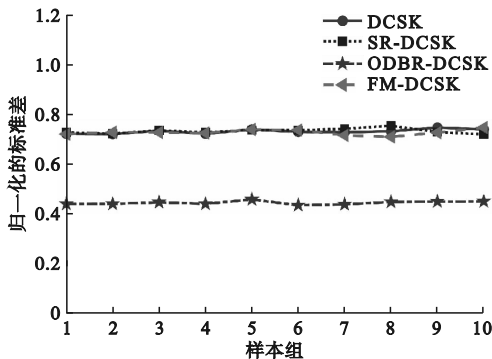


图 2 标准差特征

Fig. 2 The feature of standard deviation

2.1.2 峰度

峰度是表征概率密度分布曲线在平均值处峰

值高低的特征数。直观来看,峰度反应了峰部的尖度。计算公式为

$$k_{urt} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \right)^4 \right] \quad (6)$$

式中 k_{urt} 为样本数据的峰度函数。

DCSK、SR-DCSK、FM-DCSK、ODBR-DCSK 四种调制信号的峰度特征如图 3 所示。由图可知,ODBR-DCSK 调制信号的概率密度曲线峰值比 DCSK、FM-DCSK、SR-DCSK 调制信号的更高尖。

2.1.3 四分位数

四分位数又称为四分位点,是指将数据按从小到大排列,并等分为四个部分的数字位置。中间的四分位数即为中位数。通常说的四分位数指的是处于 25% 位置上的数值(称为下四分位数)和处于 75% 位置上的数值(称为上四分位数)。上四分位数与下四分位数的差值为四分位距,反映一组数据的分散情况。图 4、图 5 所示为 DCSK、SR-DCSK、FM-DCSK 以及 ODBR-DCSK 四种调制信号的四分位数特征。由图可知,DCSK、FM-DCSK、SR-DCSK 调制信号分散分布,而 OD-

BR-DCSK 调制信号集中分布。

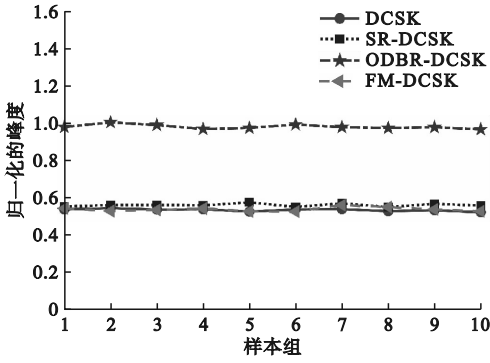


图 3 峰度特征

Fig. 3 The feature of kurtosis

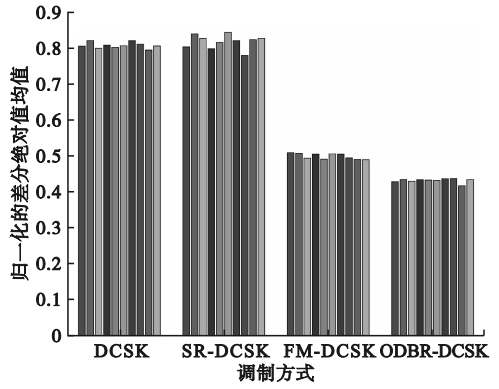


图 6 差分绝对值均值特征

Fig. 6 The feature of mean of difference absolute values

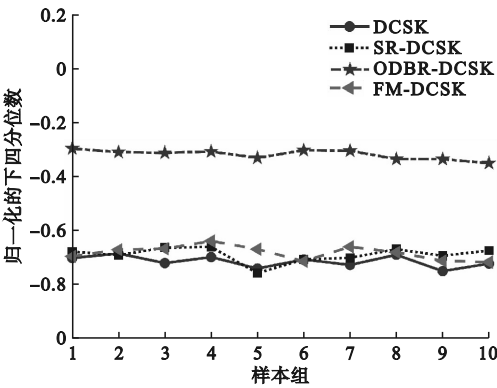


图 4 下四分位数特征

Fig. 4 The feature of lower quartile

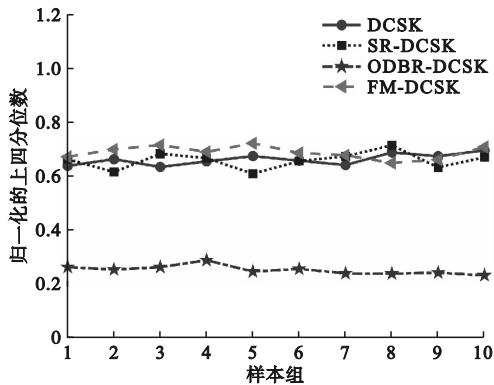


图 5 上四分位数特征

Fig. 5 The feature of upper quartile

2.2 基于时域和频域的特征分析

2.2.1 差分绝对值均值

差分绝对值均值是指时间序列相邻两个数据点之间差值的绝对值的平均值。用来描述信号的整体变化趋势,但与差分均值相比,对于离群点的影响更小,其特征如图 6 所示。

2.2.2 差分绝对值之和

差分绝对值之和是指时间序列相邻两个数据点之间差值的绝对值的总和,用来描述信号的整体变化幅度和复杂度,其特征如图 7 所示。

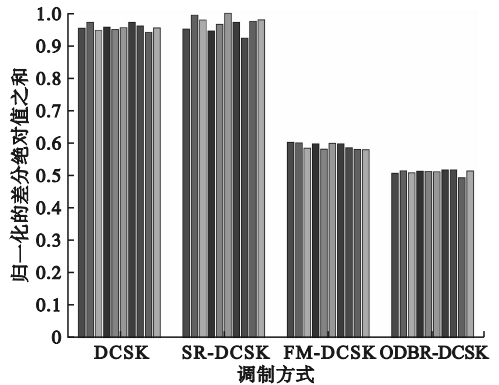


图 7 差分绝对值之和特征

Fig. 7 The feature of sum of difference absolute values

2.2.3 相关性

相关性分析是指对两个或多个具备相关特性的变量元素进行分析,从而衡量两个因素的相关密切程度。衡量两个变量之间相关性的非参数指标称为互信息,互信息的值越大,表示两个信号的相关性越强;相反,当互信息的值趋于零时,表示两个信号之间没有或几乎没有相关性。互相关计算公式为

$$R_{x_1x_2}(\tau) = \int_0^\infty x_1(t)x_2(t+\tau)dt, 0 < \tau < \infty \tag{7}$$

式中: x_1, x_2 表示两个信号; $R_{x_1x_2}(\tau)$ 表示两个信号互相关函数; τ 表示延时时间。

图 8、图 9 分别表示 DCSK 和 SR-DCSK 调制信息信号与参考信号的归一化互相关性。由图 8

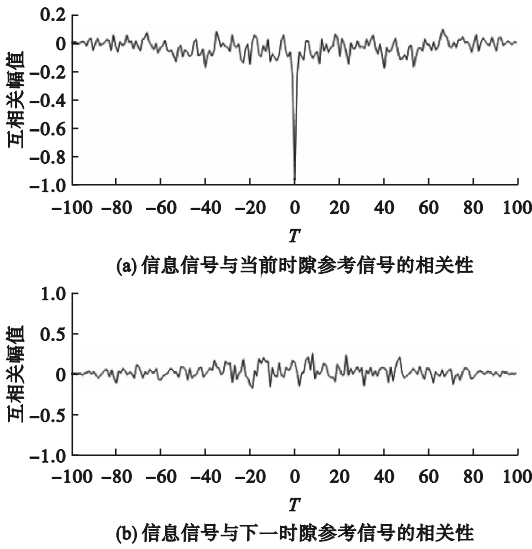


图8 DCSK调制信号的相关性

Fig.8 Correlation of the DCSK modulated signals

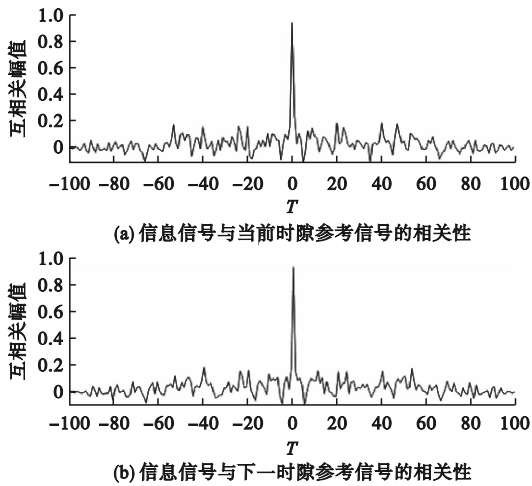


图9 SR-DCSK调制信号的相关性

Fig.9 Correlation of the SR-DCSK modulated signals

可知,DCSK 调制的信息信号与当前时隙的参考信号相关,与下一时隙的参考信号不相关。由图9可知,SR-DCSK 调制的信息信号与当前时隙的参考信号相关,与下一时隙的参考信号也相关。

2.2.4 频谱中频

频谱中频是信号频谱中心的频率,用于描述信号的频率分布情况。频谱中频通常是通过计算信号频谱中的中心位置得到,为该信号的频率分布的平均值。计算 DCSK、SR-DCSK、FM-DCSK 以及 ODBR-DCSK 调制信号的频谱中频如图10所示。由图10可知,四种调制方式产生信号的频率均平缓分布。

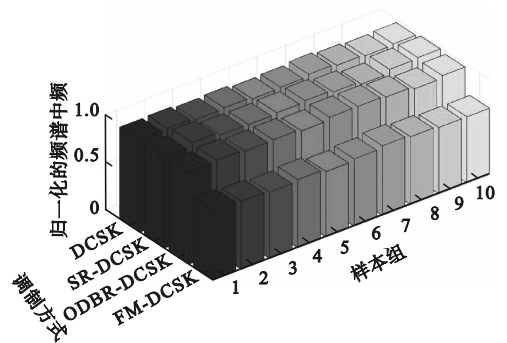


图10 频谱中频特征

Fig.10 The feature of spectral median frequency

3 建模与仿真

为了识别 DCSK、SR-DCSK、FM-DCSK、ODBR-DCSK 四种调制方式,利用 Matlab 提取信号特征参数,信号特征包括方差、标准差、相关性及频谱中频等特征。以 DCSK 为例,信号统计域部分特征参数如表1所示,数据集合可以为综合评价法相关特征权重提供参考依据。

表1 统计域特征参数

Table 1 Statistical domain feature parameters

序号	方差	标准差	下四分位数	上四分位数	峰度
N_1	0.516 28	0.718 526	-0.703 449	0.638 155	0.534 639
N_2	0.514 881	0.717 552	-0.686 585	0.662 635	0.542 232
N_3	0.533 914	0.730 694	-0.722 012	0.633 968	0.534 004
N_4	0.516 452	0.718 646	-0.699 851	0.654 497	0.535 903
N_5	0.541 442	0.735 828	-0.742 058	0.674 229	0.523 401
N_6	0.527 656	0.726 399	-0.708 665	0.657 034	0.535 063
N_7	0.524 742	0.724 391	-0.728 737	0.641 076	0.536 496
N_8	0.530 804	0.728 563	-0.691 403	0.687 658	0.525 913
N_9	0.552 675	0.743 421	-0.751 794	0.673 641	0.530 665
N_{10}	0.542 152	0.736 310	-0.723 889	0.695 312	0.520 199

DCSK 调制方式识别建模总体技术如图 11 所示。

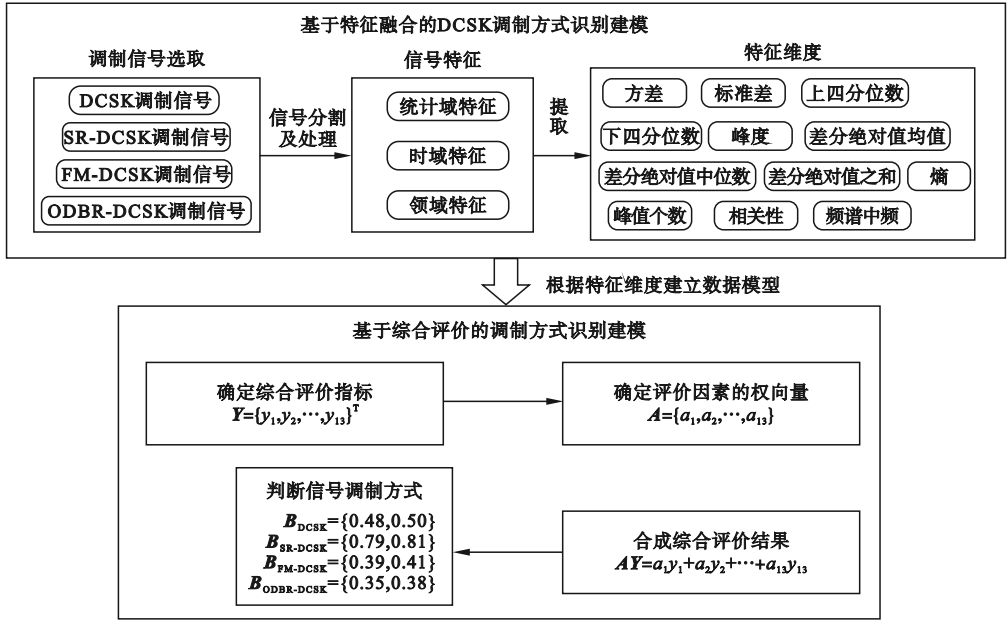


图 11 DCSK 调制方式识别建模总体技术

Fig. 11 Overall technology of DCSK modulation mode recognition modeling

利用该模型对信号调制方式进行识别的前提是半扩频因子和初始位置信号已知。四种调制信号的综合评价范围如图 11 所示,用 B 表示。

1) 确定综合评判指标

通过信号特征分析提取出 ODBR-DCSK 调制信号的 13 个特征维度 $y_i (i = 1, 2, \dots, 13)$, 将其作为信号调制方式识别的评价指标 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_{13}\}^T$, 其中特征维度参数说明如表 2 所示。由于混沌信号具有随机性, 因此采用不同混沌信号初值调制后的信号数据不同, 所提取的特征参数也会有所不同, 对综合评价结果会有一定影响, 但信号调制方式判断范围是在大量实验后综合该影响因素计算得到的, 因此不会影响最终判断结果。

表 2 特征参数

Table 2 Feature parameters

参数	数值	参数	数值
方差 y_1	0.191 121	差分绝对值之和 y_8	0.493 805
标准差 y_2	0.437 174	熵 y_9	0.897 836
下四分位数 y_3	-0.333 509	峰值个数 y_{10}	0.972 1
上四分位数 y_4	0.252 827	频谱中频 y_{11}	0.959 706
峰度 y_5	0.975 007	前相关值 y_{12}	0.6
差分绝对值均值 y_6	0.415 71	后相关值 y_{13}	0
差分绝对值中位数 y_7	0.254 712		

2) 确定评价因素的权向量

根据信号特征提取数据源, 对四种调制方式的 13 个特征维度的权重评判如下。

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_{13}\} = \{0.053, 0.053, 0.053, 0.053, 0.052, 0.06, 0.06, 0.06, 0.052, 0.052, 0.052, 0.1, 0.3\} \quad (8)$$

3) 合成综合评价结果

$$AY = a_1y_1 + a_2y_2 + \dots + a_{13}y_{13} = 0.356 7 \quad (9)$$

4) 对综合评价结果进行分析, 判断信号调制方式

式(9)结果在 ODBR-DCSK 调制信号的综合评价范围 $B_{\text{ODBR-DCSK}}$ 范围内, 可判定信号调制方式为 ODBR-DCSK 调制, 与已知调制方式相对应, 判断正确。

4 结论

本文提出了一种基于特征融合的 DCSK 调制方式识别技术。首先从统计域、时域、频域三个维度对混沌信号进行特征提取与分析; 然后将特征进行融合建立数据集合; 最后基于信号特征建立综合评价模型。该技术能有效对 DCSK、FM-DCSK、SR-DCSK、ODBR-DCSK 四种调制方式进行识别。

参考文献(References):

- [1] 张秀香. 通信调制信号方式识别技术的研究[D]. 南宁: 广西民族大学, 2021.
- [2] 张志民, 欧建平, 皇甫堪. 数字通信信号调制自动识别研究[J]. 计算机工程, 2011, 37(6): 153-156.
ZHANG Z M, OU J P, HUANGFU K. Research on automatic modulation recognition of digital communication signal[J]. Computer Engineering, 2011, 37(6): 153-156. (in Chinese)
- [3] 王海滨, 周正, 李炳荣, 等. 基于数字通信信号瞬时特性的调制方式识别方法[J]. 现代电子技术, 2019, 42(16): 22-25.
WANG H B, ZHOU Z, LI B R, et al. Method of modulation mode recognition based on instantaneous characteristic of digital communication signal[J]. Modern Electronics Technique, 2019, 42(16): 22-25. (in Chinese)
- [4] SWAMI A, SADLER B M. Hierarchical digital modulation classification using cumulants [J]. IEEE Transactions on Communications, 2000, 48(3): 416-429.
- [5] CHEN W X, JIANG Y A, ZHANG L, et al. A new modulation recognition method based on wavelet transform and high-order cumulants [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1738(1): 012025.
- [6] MAJHI S, GUPTA R, XIANG W D, et al. Hierarchical hypothesis and feature-based blind modulation classification for linearly modulated signals[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(12): 11057-11069.
- [7] 党月芳, 徐启建, 张杰, 等. 高阶累积量和分形理论在信号调制识别中的应用研究[J]. 信号处理, 2013, 29(6): 761-765.
DANG Y F, XU Q J, ZHANG J, et al. Research on modulation classification based on high-order cumulants and fractal theory [J]. Journal of Signal Processing, 2013, 29(6): 761-765. (in Chinese)
- [8] 赵雄文, 郭春霞, 李景春. 基于高阶累积量和循环谱的信号调制方式混合识别算法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(3): 674-680.
ZHAO X W, GUO C X, LI J C. Mixed recognition algorithm for signal modulation schemes by high-order cumulants and cyclic spectrum [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(3): 674-680. (in Chinese)
- [9] 张笑宇, 冯永新, 钱博. 一种分数域数字信号调制方式识别方法[J]. 弹箭与制导学报, 2021, 41(1): 13-17, 23.
ZHANG X Y, FENG Y X, QIAN B. A modulation recognition method for digital signals in fractional domain[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2021, 41(1): 13-17, 23. (in Chinese)
- [10] 张秀香, 郑鑫. 基于神经网络的5G信号调制方式识别[J]. 信息技术与信息化, 2023(3): 185-187, 192.
ZHANG X X, ZHENG X. Modulation recognition of 5G signal based on neural network[J]. Information Technology and Informatization, 2023(3): 185-187, 192. (in Chinese)
- [11] 肖子谦. 通信信号调制方式识别及变速率处理系统设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- [12] 薛德鑫, 单涛, 董士军, 等. 一种非协作通信信号调制方式识别方法[J]. 现代防御技术, 2022, 50(5): 152-159.
XUE D X, SHAN T, DONG S J, et al. Recognition method of modulation mode of non-cooperative communication signal [J]. Modern Defence Technology, 2022, 50(5): 152-159. (in Chinese)
- [13] KADDOUM G, SOUJERI E, ARCILA C, et al. I-DCSK: an improved noncoherent communication system architecture [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2015, 62(9): 901-905.
- [14] KADDOUM G, SOUJERI E, NIJSURE Y. Design of a short reference noncoherent chaos-based communication systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(2): 680-689.
- [15] 张刚, 王源, 王颖. 一种新型FM-DCSK保密通信系统[J]. 电信科学, 2015, 31(1): 59-63, 70.
ZHANG G, WANG Y, WANG Y. A novel FM-DCSK secure communication system [J]. Telecommunications Science, 2015, 31(1): 59-63, 70. (in Chinese)
- [16] 张桐, 隋涛, 虞明灯, 等. ODBR-DCSK系统调制技术研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2021, 40(3): 24-28.
ZHANG T, SUI T, YU M D, et al. Research of ODBR-DCSK system modulation technology [J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2021, 40(3): 24-28. (in Chinese)

(责任编辑: 和晓军)