آشکارسازی سیگنال‌های مخابراتی به‌کمک برازش خم

حمید نوراللهی [۱]، سید ابوالفضل حسینی [۲*]، علی شهزادی [۳] و رامین شقاقی کندوان [۴]

[۱،۲ و ۴] گروه آموزشی مخابرات دانشکده برق و کامپیوتر، واحد یادگار امام‌خمینی (ره)، شهرری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

[۳] گروه آموزشی مخابرات، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

در این مقاله روش جدیدی برای آشکارسازی سیگنال‌های مخابراتی پیشنهاد شده‌است که بر مبنای استخراج ویژگی‌های سیگنال مخابراتی به‌کمک برازش خم عمل می‌کند. در هر یک از سمبل‌های سیگنال مخابراتی یک تابع تقریب کسر گویا به‌وسیله برازش بر منحنی سیگنال آن ایجاد می‌شود. ویژگی‌های جدید به‌وسیله ضرایب چندجمله‌ای صورت و مخرج این تابع تقریب کسر گویا تعیین می‌شوند. در روش پیشنهادی دو فاز آموزش و آزمون در نظر گرفته شده‌است. ابتدا در فاز آموزش الگوریتم، تعداد مشخصی سمبل‌های تصادفی تولید می‌شود و توسط مدولاسیون دودویی ASK و FSK مدوله می‌شوند، در ادامه سیگنال مدوله شده هر یک از سمبل‌ها در کانال به نوفه جمع‌شونده گوسی آغشته می‌شود و توسط آنتن گیرنده دریافت، سپس نمونه‌های مشخصی از شکل موج سیگنال دریافت‌شده با نرخ نمونه‌برداری مشخص استخراج می‌شود. به‌ازای هر N=1500,12500 نمونه از سیگنال یک منحنی کسر گویا با درجه L و M مشخص برازش می‌شود؛ سپس تمامی ضرایب صورت و مخرج تابع کسر گویا برازش شده با درجات L و M مختلف ذخیره شده و هیستوگرام ضرایبی که قابلیت تفکیک کامل دو رده صفر و یک را دارند، به‌دست می‌آیند؛ لذا تمامی ضرایب با درجات L و M مختلفی که امکان تفکیک کامل را دارند همراه با مرز تصمیم‌گیری‌شان در یک جدول ذخیره می‌شوند. گفتنی است که داده‌های مورد استفاده جهت استخراج و شناسایی ضرایب تفکیک‌کننده، داده‌های آموزشی هستند. سرانجام جهت آنالیز کارایی روش پیشنهادی، تعداد مشخصی از داده‌های آزمون با مدولاسیون مشخص ارسال و با مقایسه با مرزهای تصمیم‌گیری به‌دست‌آمده در فاز آموزش نسبت به رده‌بندی آن در رده مورد نظر تصمیم‌گیری می‌شود. نتایج رده‌بندی روش پیشنهادی بیان‌گر برتری روش پیشنهادی در مقایسه با روش احتمال خطا تئوری است.

واژگان کلیدی: آشکارسازی، استخراج ویژگی، برازش منحنی، رده‌بندی

Signal detection Using Rational Function Curve Fitting

Hamid Nourollahi[1], S. Abolfazl Hosseini[2]*, Ali Shahzadi[3] & Ramin Shaghaghi Kandovan[4]

Department of Communication Engineering, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Yadegar -e-Imam Khomeini (RAH) Shahre Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran[1,2,4]

Department of Communication Engineering, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Iran [3]

Abstract

In this manuscript, we proposed a new scheme in communication signal detection which is respect to the curve shape of received signal and based on the extraction of curve fitting (CF) features. This feature extraction technique is proposed for signal data classification in receiver. The proposed scheme is based on curve fitting and approximation of rational fraction coefficients. For each symbol of received signal, a specific rational function approximation is developed to fit with received signal curve and the coefficients of the numerator and denominator polynomials of this function are considered as new extracted features. Then it will be shown that the coefficients of this polynomials have the potential for using as new features in a statistical classifier and have better performance in competition with other solutions such as linear and even nonlinear feature extraction methods in classification. The criteria

* نویسندهٔ عهده‌دار مکاتبات

* Corresponding author

• تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۷/۱۴ • تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۹/۱۵ • تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۲/۲۹ • نوع مطالعه: پژوهشی

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/jsdp.19.4.3]

used in performance evaluation are probability of error and signal to noise ratio in FSK and ASK modulations. For each symbol of received signal, a specific rational function approximation is developed to fit with received signal curve and the coefficients of the numerator and denominator polynomials of this function are considered as new extracted features. In the proposed method, there are two phases train and test, which are described in the following two steps. First, in the train phase, the algorithm starts by using binary FSK and ASK modulations, so first, a system generate a number of random symbols then signal is modulated by binary ASK and FSK. The Modulated FSK and ASK signals are corrupted in the channel with noise. The noise-corrupted signal enters the receiver at the corresponding transmitted interval. Then, the samples are extracted from the modulated signals based on predetermined sample rates. Then, we fit a rational fraction curve with degrees of L and M to each set of N samples. Afterward, we apply all the numerator (L+1) and denominator (M) coefficients to 0 and 1 classes in the binary FSK and ASK modulations. We store all the specific coefficients of the deterministic symbols at different M and L values to create the corresponding histogram in each class. In each histogram (i.e., the coefficients of a class), we extract and store specific coefficients that completely discriminate between the two classes. Therefore, we determine all the histograms where there is a good approximation of discrimination and create the related table. Note that the data used in histograms are the training data. Then, in order to analyze and evaluate the performance of the proposed curve fitting method, we send the testing data through the channel corresponding to the related modulator. The results of the proposed classification method show that it provides smaller error rate regarding to the theoretical error rate probability in AWGN channel.

Keywords: detection, feature extraction, curve fitting, classification

۱- مقدمه

تئوری آشکارسازی درواقع کاربرد آزمون فرضیه آماری در کشف سیگنال‌های آغشته به نوفه را بیان می‌دارد. گستردگی کاربرد این موضوع در سامانه‌های مختلف (در رادار برای تشخیص وجود و یا عدم وجود هدف، در سونار برای تشخیص حضور زیردریایی دشمن، در پزشکی برای تشخیص بی‌نظمی در ضربان قلب، در کنترل برای تشخیص وقوع تغییرات ناگهانی در سامانه تحت‌کنترل، در پردازش تصویر برای تشخیص اثر انگشت، در لرزه نگاری برای تشخیص بود و نبود میدان‌های نفتی و سایر کاربردها از قبیل: آشکارسازی یک چرخبال در تصاویر مادون‌قرمز، آنالیز داده‌های حاصل از پدیده‌های فیزیکی، آزمایشات پزشکی و ...) میزان اهمیت پژوهش در این راستا را بیان می‌دارد.

در مسائل مربوط به آشکارسازی با دو سؤال، مواجه هستیم، آیا آشکارساز طراحی‌شده عملکرد خوبی دارد و آیا این آشکارساز اشتباه هم می‌کند؟ پس باید آشکارسازی طراحی شود که علاوه‌بر بهینه‌بودن، احتمال خطا را نیز به کمینه برساند.

روش‌های آشکارسازی با فرضیه ساده عبارتند از آزمون فرضیه باینری در ساختارهای مختلف آشکارسازی، آشکارساز بیشینه احتمال پسین (MAP)، آشکارساز ML، آشکارساز بیز، آشکارساز بیز چندگانه (آزمون فرضیه چندگانه)، آشکارساز Min-Max، آشکارساز نیمن – پیرسون

از روش‌های آشکارسازی اصول آزمون‌های فرضیه مرکب نیز می‌توان به آزمون فرضیه مرکب دوطرفه و یک‌طرفه (بیان آزمونUMP)، آشکارساز ALR، آشکارساز GLR، آشکارساز Clairvoyance، آزمون (آشکارساز) رائو (Rao Test) اشاره کرد.

به‌طور کلی آشکارسازی را از لحاظ ماهیت سیگنال به دو دسته کلی آشکارسازی سیگنال‌های قطعی[1] و تصادفی تقسیم می‌کنند.

از روش‌های متداول آشکارساز سیگنال‌های قطعی می‌توان به آشکارساز فیلتر منطبق، آشکارساز فیلتر منطبق توسعه‌یافته(GMF) و از آشکارسازهای سیگنال تصادفی به آشکارساز انرژی و آشکارساز انرژی تعمیم‌یافته اشاره کرد.

مخابرات یک دانش تخصصی غنی از چگونگی مدل‌کردن کانال‌ها از انواع مختلف آن [1],[2]، جبران غیر ایده‌آل‌بودن سخت‌افزارهای مختلف [3] [4]، طراحی آشکارسازها و سیگنالینگ بهینه‌ای است که انتقال مطمئن داده را فراهم می‌کند [5]. از آنجایی که تفاوت اشکال در سیگنال‌های دریافتی سمبل‌ها منجر به ضرایب متفاوت در تابع برازش خم می‌شوند؛ لذا به نظر می‌رسند که به‌کمک این ضرایب برازش خم می‌توان به رده‌بندی خم‌های سیگنال‌های سمبل‌ها دست پیدا کرد. در ادامه به‌ضرورت و دلایل به‌کارگیری هوش‌مصنوعی در سامانه‌های مخابراتی و آشکارسازی سیگنال اشاره می‌شود.

نخست آنکه بیشتر الگوریتم‌های پردازش سیگنال در مخابرات دارای پایه و استدلال قوی در آمار و تئوری اطلاعات هستند و اغلب برای مدل‌های ریاضی مهار شدنی قابل پیاده‌سازی و بهینه هستند. حال آنکه یک سامانه

[1] Deterministic

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/jsdp.19.4.3]

عملی دارای بسیاری غیر ایده‌آل‌ها و غیرخطی‌هاست [4] (همچون تقویت‌کننده‌های غیرخطی و کوانتیزه رزولوشن محدود). سامانه ارتباطی مبتنی بر هوش‌مصنوعی (شناسایی پترن) نیاز به یک مدل ریاضی مهار شدنی ندارد و می‌تواند برای پیکربندی سخت‌افزاری مشخصی بهینه شود و کانال نیز می‌تواند برای این‌گونه غیر ایده‌آل‌بودن‌ها، بهتر بهینه شود.

دوم یکی دیگر از اصول طراحی سامانه‌های مخابراتی تقسیم پردازش سیگنال بر روی زنجیره‌ای از بلوک‌های مستقل چندگانه است که هرکدام یک تابع تعریف‌شده و ایزوله‌شده (مانند کدینگ منبع / کانال، مدولاسیون، تخمین کانال، متعادل‌سازی) را اجرا می‌کند. اگرچه این یافته منجر به سامانه‌های مؤثر و قابل کنترل امروزی شده، اما بلوک‌های پردازش بهینه‌شده انفرادی ممکن است به بهترین کارایی ممکن انتها به انتها منجر نشود. برای مثال جداسازی کدینگ کانال و منبع برای کانال‌های عملی و طول‌های بلوک کوتاه (به مرجع [6] و مرجع‌های داخل آن رجوع شود) همچون جداسازی کدینگ و مدولاسیون [7] به‌عنوان زیر بهینه[1] شناخته می‌شوند. تلاش در جهت بهینه‌سازی زنجیره‌ای از این مؤلفه‌ها بر پایه گراف‌های عامل‌شان [8] منجر به دست‌یابی به بهره[2]، اما در عین حال منجر به پیچیدگی محاسباتی و غیرعملی‌بودن آن نیز می‌شود.

سوم در [9] از شبکه هوش‌مصنوعی[3] به‌عنوان یک تقریب‌زن جهانی یاد شده‌است و یافته‌های اخیر برای یادگیری الگوریتم با شبکه عصبی بازگشتی یک ظرفیت [10] قابل توجهی را نشان‌می‌دهد که می‌تواند تورینگ کامل[4][11] را تداعی کند. همچنین اثبات می‌شود که الگوریتم‌های یادگیری در ساختار موازی برخلاف هزینه انرژی کمتر از سرعت و دقت بیشتری نسبت به ساختار معادل غیر موازی‌شان، برخوردارند [12].

چهارم ساختارهای با حافظه توزیع‌شده و پردازش‌های موازی حجیم همچون واحدهای پردازش گرافیکی[5] که تراشه‌های خاصی برای پردازش‌های شبیکه‌های عصبی بازگشتی هستند [13]، از مصرف انرژی کمتر و مؤثر قابل توجهی برخوردارند [14].

یک سامانه ارتباطی انتهابه‌انتهای آموزش‌دیده آن ساختار ماژولار سخت‌گیرانه را ندارد و برای کارایی انتهابه‌انتها طراحی شده‌است.

در همین اواخر به‌کارگیری روش‌های هوش‌مصنوعی همچون شناسایی پترن در سامانه‌های مخابراتی به‌منظور رسیدن به یک مدل نزدیک به شرایط واقعی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند.

در [15] به بررسی مناسب‌ترین برازش خم در یک سری داده دلخواه داده شده به‌کمک خانواده‌ای از منحنی‌ها و سطح‌ها اشاره شده‌است. در بررسی صورت‌گرفته، کمینه‌کردن مجموع فواصل عمودی نقاط با سطح مورد هدف با معیار میرایی در برازش مورد توجه قرار گرفته است.

در [16] به مسأاله برازش خم از دید نگاشت داده‌های جداشدنی غیرخطی به نوع جداشدنی خطی آن پرداخته‌است؛ درحقیقت تبدیل خطی یا تربیعی، نگاشت داده‌ها را به یک فضای جدید برای رده‌بندی بهتر هموار می‌کند. همچنین سعی شده‌است که فضای جدید نگاشت‌شده دارای ابعاد کمتر و برابر با تعداد رده‌ها باشد؛ سپس در فضای جدید از بردار ماشین پشتیبان خطی برای رده‌بندی داده‌های آموزشی استفاده شده‌است.

برازش خم به‌عنوان یک رده‌بندی‌کننده دودویی[6] در الگوریتم کدهای خروجی تصحیح‌کننده خطا[7] برای حل مسائل رده‌بندی چند رده در مرجع [17] پیشنهاد شده‌است. مؤلف با ارائه پنج کدکننده و هشت دکدکننده از الگوریتم کدهای خروجی تصحیح‌کننده خطا و با مقایسه نتایج برازش خم با رده‌بندی آدابوست[8] و طبقه‌بند نزدیک‌ترین میانگین[9] روش برازش خم را به‌عنوان یک طبقه‌بند پایه مطلوب معرفی کرده است.

در داده‌های ابر طیفی کاهش ویژگی (انتخاب یا استخراج ویژگی) از اهمیت بالایی برخوردار است در [18] و [19] یک روش استخراج ویژگی بر پایه برازش خم کسر گویا ارائه شده‌است. برای هر پیکسل از یک تصویر ابر طیفی، یک تابع تقریب کسر گویا مجزا از طریق برازش بر منحنی پاسخ طیفی آن پیکسل تولید شده‌است. ضرایب چندجمله‌ای صورت و مخرج این تابع به‌عنوان ویژگی‌های جدید معرفی شده‌است. روش پیشنهادی بر ماهیت هندسی منحنی‌های پاسخ طیفی تأکید و تمرکز دارد و بر این واقعیت تأکید دارد که توالی نقاط در این منحنی‌ها حاوی اطلاعات مفیدی است.

سیگنال صدای تولیدشده از فعالیت مکانیکی قلب دارای اطلاعات مفیدی است که می‌تواند در عمل‌های

[1] sub-optimal
[2] Gain
[3] Artificial Neural Networks (ANN)
[4] Turing-complete
[5] graphic processing units (GPUs)

[6] binary classifier
[7] Error Correcting Output Codes (ECOC)
[8] Adaboost classification
[9] Nearest Mean Classifier (NMC)

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.61186/jsdp.19.4.3]

دریچه قلب به کار گرفته شود. جهت تفکیک سیگنال‌های قلب در حالت‌های طبیعی و غیرطبیعی اشخاص استخراج ویژگی حائز اهمیت می‌شود. مؤلف در [20] استخراج ویژگی‌ها را در دنباله سیگنال صدای قلب به‌کمک برازش خم مدنظر قرار داده است.

در [21] به‌کمک برازش خم یک مدل جهت پیش‌گویی اتلاف مسیر بر پایه اندازه‌گیری‌های میدانی توان سیگنال در سامانه مخابراتی وایمکس پیشنهاد شده‌است.

در این مقاله یک روش نوین از آشکارسازی سیگنال‌های مخابراتی مبتنی بر برازش منحنی و تقریب ضرایب کسر گویا ارائه شده‌است. در مقادیر مختلفی از سیگنال به نوفه و نرخ نمونه‌برداری، هیستوگرام ضرایب قابل تفکیک نشان داده‌می‌شود. همچنین کارایی این روش به‌کمک نتایج شبیه‌سازی در مقایسه با روش آشکارسازی احتمال خطای تئوری با مقایسه احتمال خطای در شرایط برابر کانال و سیگنال به نوفه در مدولاسیون‌های FSK و ASK نمایش داده‌می‌شود.

۲- مروری کوتاه بر تئوری آشکارسازی ردهیک و روش‌های برازش خم

روش‌های مختلف آشکارسازی سیگنال‌های تصادفی از آزمون فرضیه دودویی در ساختارهای مختلف آشکارسازی، آشکارساز بیشینه احتمال پسین (MAP)، آشکارسازML، آشکارساز بیز، آشکارساز بیز چندگانه (آزمون فرضیه چندگانه)، آشکارسازMin-Max، آشکارساز نیمن – پیرسون از یک تئوری مشترک مبتنی بر تابع چگالی احتمال رخداد هر یک از فرضیه‌ها تبعیت می‌کند.

۲-۱- تئوری آشکارسازی ردهیک

در [22] به یک نتیجه کلی در خصوص روش‌های مختلف ردهیک اشاره شده و به یک معادله آزمون بهینه کلی در مسأله آزمون فرضیه دودویی دست پیدا کرده است.

در به‌کارگیری از آزمون بیز یا آشکارساز نیمن – پیرسون، آزمون بهینه درحقیقت آزمون نسبت بیشینه تشابه است که عبارت است از:

$$\mathbf{\Lambda(R)} = \frac{\boldsymbol{P_{r|H_1(R|H_1)}}}{\boldsymbol{P_{r|H_0(R|H_0)}}} \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} \eta \qquad (۱)$$

$$\mathbf{\Lambda(R)} = \frac{\boldsymbol{P_{r|H_1(R|H_1)}}}{\boldsymbol{P_{r|H_0(R|H_0)}}} \underset{H_0}{\overset{H_0}{<}} \eta$$

معادله بالا در حالت کلی مستقل از ابعاد فضای مشاهده‌است. آزمون شامل مقایسه متغییر عددی $\mathbf{\Lambda(R)}$ با یک سطح آستانه η است.

علاوه بر این می‌توان برای تعیینR از معادله (۲) بهره برد:

$$\beta_i(R) = \sum_{j=0}^{M-1} C_{ij}\, P_r(H_j|R) \qquad (۲)$$

i=0,1, …, M-1

که در آن M الفبای مدولاسیون و $\beta_i(\mathbf{R})$ مقداری است که در سمبل دریافتی iام می‌بایست محاسبه و کمترین مقدار آن جهت R موردنظر، انتخاب شود.

۲-۲- برازش منحنی و قابلیت تفکیک‌کنندگی آن

در بسیاری از مسائل مربوط به اندازه‌گیری، رابطه‌ای ریاضی بین مقادیر مشاهده و متغیر نشان‌دهنده دفعات اندازه‌گیری می‌توان یافت. برازش منحنی رەیافتی معمول برای یافتن این رابطه ریاضی است؛ به‌علاوه، برازش منحنی به منظورهای‌ی نظیر کاهش نوفه و هموارسازی داده‌ها، جبران‌سازی خطا، درون‌یابی و برون‌یابی داده‌ها نیز قابل استفاده‌است.

هدف از برازش منحنی‌یافتن تابعی مانند f (t) از یک دسته از پیش مشخص‌شده توابع برای مجموعه نقاطی به فرم $\{(t, I_t)|t = 1, 2, \dots, N\}$ است؛ به‌نحوی که فاصله وزن‌دار بین نقاط مشاهده و مقادیر حاصل از f (t) کمینه شود. معیارهای متعدد برازش نظیر حداقل مربعات[1] (LS)، کمینه مطلق مانده‌ها[2] (LAR)، یا برازش مربعی دوگانه[3] می‌تواند برای انجام برازش خطی یا غیرخطی (نمایی و یا گونه‌ای دیگر) به کار رود. در روش کمینه مربعات، تابع f (t) از طریق کمینه‌سازی عبارت میانگین خطای مربعی وزن‌دار که در معادله (۳) مشاهده می‌کنید به‌دست می‌آید:

$$\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N} w_t\,(f(t) - I_t)^2 \qquad (۳)$$

در روش‌های LAR و برازش مربعی دوگانه از فرایندی بر پایه تکرار برای یافتن f (t) بهره برده می‌شود که مقاوم‌تر و در عوض پیچیده‌تر است.

مدل‌های متنوعی از برازش منحنی نظیر چندجمله‌ای، خطی، اسپلاین و... وجود دارد. در این پژوهش یک مدل خاص از برازش غیرخطی با استفاده از

[1] Least squares
[2] Least absolute residuals
[3] Bisquare fitting

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.61186/jsdp.19.4.3]

توابع کسری گویا مد نظر قرار گرفته که تعداد پارامترهای آن از تعداد نقاط مشاهده به میزان قابل توجهی کمتر است. مدل یادشده با الهام از تقریب‌زن چندجمله‌ای Padé پیشنهاد شده‌است.

از روش‌های برازش منحنی می‌توان به روش‌های برازش به‌کمک توابع چندجمله‌ای، برازش به‌کمک خط (چندجمله‌ای درجه ۱)، برازش به‌کمک چندجمله‌ای درجهn تقریب چندجمله‌ای کسر گویا اشاره کرد. در ادامه روش تقریب چندجمله‌ای کسر گویا تشریح می‌شود.

در میان تمام تقریب‌های به فرم کسر گویا و از مرتبه‌ای خاص از یک تابع معلوم f (t)، تابع تقریب زن معرفی‌شده توسط هنری پده[1]، بهترین تقریب را ارائه می‌دهد، به‌گونه‌ای که سری توانی تابع تقریب‌زن و تابع تقریب زده‌شده بر هم منطبق می‌شوند. این تابع تقریب‌زن، در بسیاری موارد از سری تیلور نیز بهتر عمل می‌کند و حتی در مواقعی که سری تیلور واگرا می‌شود می‌تواند همچنان تقریب خوبی ارائه دهد. تابع f و پارامترهای صحیح $L \geq 0$ و $M \geq 0$ را در نظر بگیرید. تابع تقریب زن چندجمله‌ای پده از مرتبه (L, M) به‌صورت تابع کسری گویای زیر تعریف می‌شود:

$$[L/M]_f(t) \triangleq \hat{f}(t) = \frac{\sum_{j=0}^{L} c_{j+M+1} t^j}{1+\sum_{j=1}^{M} c_j t^j} \qquad (۴)$$

این تقریب بر f (t) با نهایت دقت ممکن منطبق است، به‌گونه‌ای که:

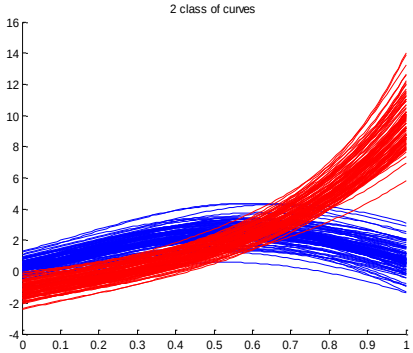
$$f^{(i)}(0) = \hat{f}^{(i)}(0) \qquad i = 0,1,..,M+L \qquad (۵)$$

که در آن $f^{(i)}(.)$ عبارت است از مشتق i ام تابع f. به‌بیان دیگر، اگر تابع تقریب‌زن را به‌صورت سری مک لورن گسترش دهیم، نخستین M+L جمله آن با جملات متناظر در بسط مک لورن f (t) منطبق است. در حالتی که M صفر باشد، تقریب زن پده همان گسترش مک لورن تابع f (t) خواهد بود.

از مزایای چندجمله‌ای کسر گویا می‌توان به داشتن فرم به‌نسبه ساده، مستقل‌بودن از متریک مورد استفاده و قابلیت تطبیق با جابه‌جایی نقاط و تغییر مقیاس محورها، قابلیت منطبق‌شدن بر گروه وسیع‌تری از اشکال نسبت به مدل چندجمله‌ای، قدرت درون‌یابی بهتر به‌دلیل هموارتربودن و داشتن خاصیت نوسانی کمتر (در مقایسه با چندجمله‌ای‌ها)، قدرت برون‌یابی فوق‌العاده، خواص مجانبی بسیار خوب، قابلیت اعمال به ساختارهای پیچیده با چندجمله‌ای‌هایی با درجه پایین در صورت و مخرج این یعنی در مقایسه با مدل چندجمله‌ای برای همان ساختار، به محاسبه تعداد ضرایب کمتری نیاز داریم و حجم محاسبات قابل قبول اگرچه مدلی غیر خطی محسوب می‌شوند، اما مدل غیر خطی ساده‌ای هستند.

۲-۳- قابلیت برازش منحنی برای اهداف رده‌بندی

در بخش‌های قبلی مسأله برازش منحنی و تقریب پده توضیح داده شدند. از آنجا که تفاوت بین منحنی‌های مختلف، موجب تفاوت در ضرایب تابع تقریب‌زن پده متناظر با آنها می‌شود، به نظر می‌رسد که این ضرایب می‌توانند به‌عنوان ویژگی‌هایی ممیز برای تفکیک منحنی‌هایی از خانواده‌های مختلف از یکدیگر عمل کنند. برای مثال در ادامه دو نمونه از دسته منحنی‌ها به رنگ‌های آبی و قرمز که در شکل (۱-الف) آمده است همراه با هیستوگرام ضرایب مربوطه و ضرایب تفکیک‌کننده به‌ترتیب در شکل‌های (۱-ب و ۱-پ) آمده است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌کنید ضرایب برازش منحنی در دو منحنی در برخی ضرایب با یکدیگر هم‌پوشانی دارند و در برخی ضرایب به‌طور کامل از یکدیگر تفکیک‌پذیرند. چنان که در این شکل مشهود است، هیستوگرام بعضی از این ضرایب به‌تنهایی توانایی تفکیک دو خانواده منحنی را دارد. این واقعیت انگیزه اولیه برای استفاده از ضرایب برازش منحنی را به‌عنوان ویژگی ممیز در امر رده‌بندی سیگنال‌های دریافتی در گیرنده فراهم می‌کند.



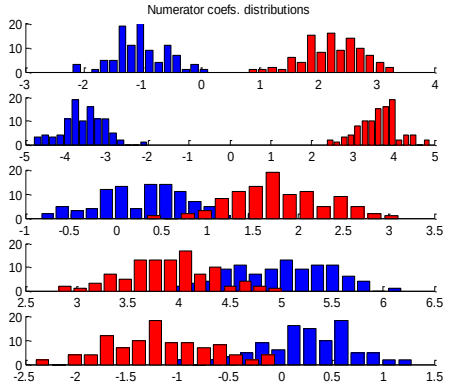
(شکل ۱-الف): دو نمونه دسته منحنی

(Figure 1-a): Two samples of curved clusters

[1]Henri Padé

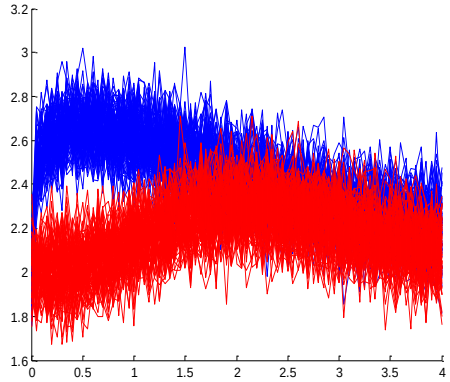
[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/jsdp.19.4.3]



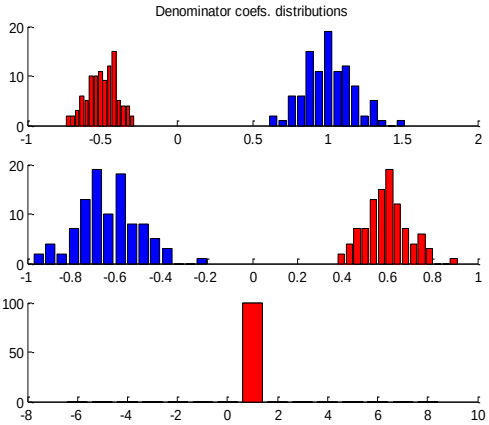
(شکل ۱–ب): هیستوگرام ضرایب صورت برازش خم دو نمونه دسته منحنی

(Figure 1-b): histograms of numerator coefficients for two different clusters of curves



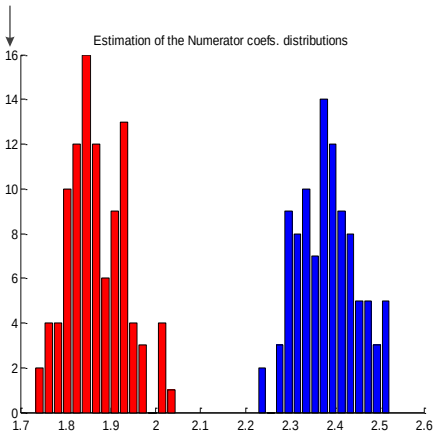
(شکل–۱–ث): دو نمونه دسته منحنی آغشته به نوفه

(Figure-1-e): The noise-corrupted curve clusters



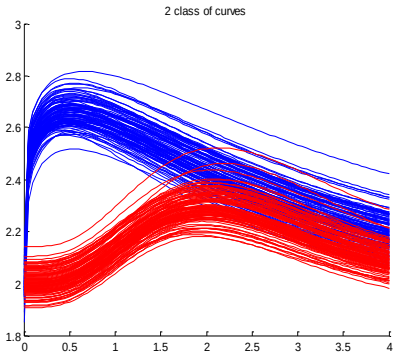
(شکل ۱–پ): هیستوگرام ضرایب مخرج برازش خم دو نمونه دسته منحنی

(Figure 1-c): histograms of denominator coefficients for two different clusters of curves



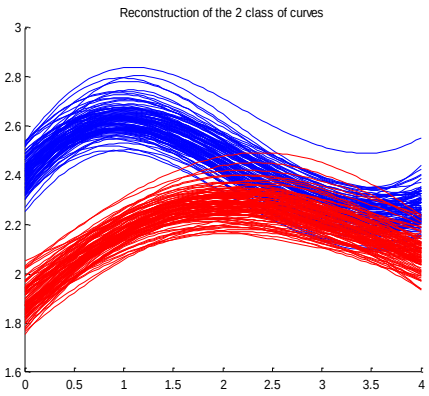
(شکل–۱–ج): ضرایب تفکیک‌کننده

(Figure-1-f): the discriminating coefficients



(شکل–۱–ت): دو نمونه دسته منحنی

(Figure-1-d): Two samples of curved clusters



(شکل–۱–چ): دسته منحنی‌های بازسازی‌شده

(Figure–1-g): The reconstructed curve clusters from the noise-corrupted curve clusters

در ادامه امکان تفکیک و رده‌بندی منحنی‌ها در شرایطی که منحنی سیگنال‌های ارسالی با مدولاسیون مربوطه آغشته به نوفه جمع‌شونده گوسی باشند، بررسی‌شده‌اند. در شکل (۱–ت) دو نمونه دیگر از دسته منحنی نمایش داده شده‌است و در شکل‌های (۱–ث، ۱–ج، ۱–چ) به‌ترتیب دسته منحنی‌های آغشته به نوفه و ضرایب تفکیک‌کننده و دسته‌منحنی‌های بازسازی‌شده به نمایش در آمده‌اند.

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/jsdp.19.4.3]

۳- روش استخراج ویژگی پیشنهادی

اشاره شد که هر سیگنال دریافتی از یک فرستنده مخابراتی ترکیبی از سیگنال فرستنده، تداخل و نوفه است؛ لذا سیگنال دریافتی ماهیت تصادفی داشته و شکل هندسی خاصی ندارد. به بیانی دیگر، هر سیگنال دریافتی را می‌توان به‌صورت نمودار تابعی به فرم f (t) در نظر گرفت. اگر چه رابطه ریاضی دقیق f (t) بر ما آشکار نیست، اما مقادیر تابع در N نقطه متوالی اندازه‌گیری شده‌است که می‌تواند به ما برای برازاندن یک منحنی بر این منحنی کمک کند. نشان خواهیم داد که می‌توان با روشی مبتنی بر کمینه‌مربعات خطا، تقریبی ریاضی از f (t) به فرم یک تابع کسری گویا با چندجمله‌ای‌هایی درصورت و مخرج به‌دست‌آورد؛ سپس نشان داده خواهد شد که ضرایب این چندجمله‌ای‌ها قابلیت این را دارند که به‌عنوان ویژگی‌های استخراجی جدید برای یک طبقه‌بند آماری (نظیر طبقه‌بند بیشینه احتمال) به کار روند و نتایج رضایت‌بخشی را در رقابت با برخی دیگر از روش‌های استخراج ویژگی خطی و حتی غیرخطی اعم از با نظارت و بدون نظارت تولید کنند.

تقریب کسری برای تابع f (.) متناظر با شکل موج سیگنال دریافتی آغشته به نوفه در گیرنده به‌صورت زیر در نظر گرفته‌می‌شود:

$$[L/M]_f(t) \triangleq \hat{f}(t) = \frac{\sum_{j=0}^{L} c_{j+M+1} t^j}{1+\sum_{j=1}^{M} c_j t^j} \quad (۶)$$

که در آن بردار ضرایب $C=\{c_1\ c_2\ \dots\ c_{M+L+1}\}^t$ از طریق کمینه سازی میانگین مربعات خطا به‌صورت زیر تعیین می‌شود.

$$E = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}(\hat{f}(t) - f(t))^2 \quad (۷)$$

که در آن N تعداد نقاط نمونه‌برداری شده از سیگنال است. با محاسبه و برابر صفر قراردادن مشتق بالا نسبت به ضرایب خواهیم داشت:

$$\frac{\partial E}{\partial c_i} = 0; \quad i=1,\dots,M \quad (۸)$$

$$\sum_{t=1}^{N} \frac{-2t^j}{1+\sum_{j=1}^{M} c_j t^j}\left(\sum_{j=0}^{L} c_{j+M+1}\, t^j\right) \times \left(\hat{f}(t) - f(t)\right) \quad (۹)$$

$$\frac{\partial E}{\partial c_i} = 0; \quad i=M+1, \dots, M+L+1 \quad (۱۰)$$

$$\sum_{t=1}^{N} \frac{-2t^{i-M-1}}{1+\sum_{j=1}^{M} c_j t^j}\left(\hat{f}(t) - f(t)\right) = 0 \quad (۱۱)$$

یک شرط لازم و نه کافی برای حل دستگاه معادلات غیرخطی بالا یافتن بردار C می‌باشد به‌گونه‌ای که:

$$\frac{\sum_{j=0}^{L} c_{j+M+1} t^j}{1+\sum_{j=1}^{M} c_j t^j} = f(t); \quad t = 1, \dots, N \quad (۱۲)$$

بدین ترتیب یک دستگاه از N معادله خطی با M+L+1 مجهول خواهیم داشت که به‌صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$\sum_{j=0}^{L} c_{j+M+1}\, t^j - f(t)\sum_{j=1}^{M} c_j\, t^j = f(t); t = 1, \dots, N \quad (۱۳)$$

و با نمایش آنبه‌صورت ماتریسی خواهیم داشت:

$$A_{N\times(M+L+1)} C_{(M+L+1)\times 1} = B_{N\times 1} \quad (۱۴)$$

که در آن:

$$A_{N\times(M+L+1)} = [a_{tj}] \quad (۱۵)$$

$$a_{tj} = \begin{cases} -f(t)(t)^j & j = 1, \dots, M \\ (t)^j & j = M+1, \dots, M+L+1 \end{cases} \quad (۱۶)$$

$$B=[f(1), f(2), \dots, f(N)]^T \quad (۱۷)$$

منطقی به نظر می‌رسد که M+L+1<<N تا تعداد ویژگی‌های استخراجی در مقایسه با تعداد نمونه‌های اولیه گرفته‌شده از سیگنال کاهش قابل توجهی داشته‌باشد؛ بنابراین ماتریس A مربعی نخواهد بود و دستگاه معادلات خطی ۱۴ نمی‌تواند پاسخی یکتا داشته‌باشد و حتی ممکن است پاسخی نداشته‌باشد. با این حال می‌توان با بهره‌گیری از شبه‌وارون‌ها بردار C را به‌گونه‌ای یافت که نرم ماتریس AC-B کمینه شود. در این مقاله ما از شبه‌وارون مور-پن[1] روز استفاده می‌کنیم.

۳-۱- به‌کارگیری برازش خم در آشکارسازی

روش جدیدی در خصوص آشکارسازی سیگنال‌های مخابراتی با مدولاسیون مختلف به‌کمک برازش منحنی و تقریب کسر گویا پیشنهاد شده‌است. برای هر سمبل از مدولاسیون انتخابی یک تابع تقریبی کسرگویای جداگانه از طریق برازش بر منحنی سیگنال ارسالی هر سمبل در بازه زمانی مربوطه تولید می‌شود. ویژگی‌های جدید و ممیز این سیگنال‌ها، ضرایب صورت و مخرج این تابع انتخاب می‌شوند. روش پیشنهادی بر مقایسه و آنالیز ضرایب برازش خم از نمونه‌های نمونه‌برداری‌شده سمبل‌های مدولاسیون استوار است. کانال دارای نوفه جمع‌شونده گو سی درنظر گرفته شده‌است و مدولاسیون‌های دیجیتال ASK و FSK دودویی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. نتایج رده‌بندی با طبقه‌بند به‌وسیله ویژگی ضرایب معرفی‌شده حکایت از کارایی و قدرت روش پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌های رایج و معمول را دارد.

[1] Moore_Penrose

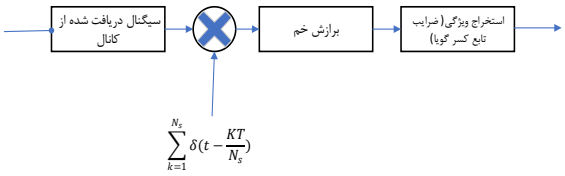
[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.61186/jsdp.19.4.3]

۳-۲- مدل سامانه

در مدل پیشنهادی یک سامانه ارسال و دریافت عمومی مخابرات با مدولاسیون کلید زنی شیفت دامنه و فرکانس در نظر گرفته شده‌است. همان‌گونه که در اشکال ۲ و ۳ نشان داده شده‌است، ابتدا دنباله‌ای تصادفی داده‌ها وارد سامانه شده، سپس با اعمال مدولاسیون کلیدزنی دامنه / فرکانس سیگنال مدوله می‌شود و بعد از آن، وارد کانال AWGN می‌شود.

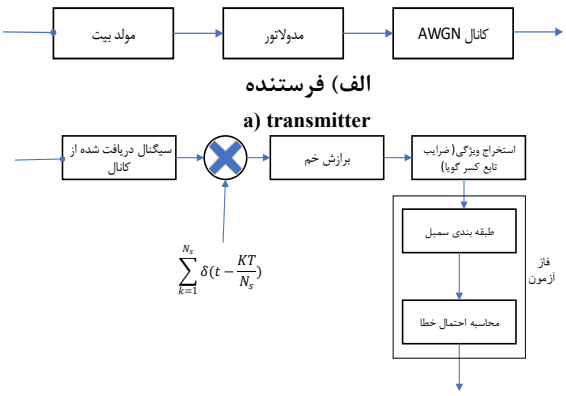
در گیرنده، عکس عمل در فرستنده انجام‌می‌شود، سیگنال دریافتی از آنتن گیرنده به‌وسیله طبقه‌بند آموزش‌دیده دمدوله و آشکار می‌شود. البته این عمل دمدوله‌سازی و آشکارسازی توسط تقریب کسر گویا صورت می‌پذیرد.

کلیه این عملیات در مرحله آموزش و آزمون صورت‌می‌گیرد. در مرحله آموزش رده‌بند را به‌کمک داده‌های آموزشی آموزش می‌دهیم و سپس در مرحله آزمون با داده‌های جدید از طبقه‌بند آزمون صحت و خطا گرفته‌می‌شود تا کارایی طبقه‌بند مشخص شود.



(شکل-۲): مدل سامانه در گام آموزش

(Figure-2): system model in train phase



الف) فرستنده

a) transmitter

ب) گیرنده

b) receiver

(شکل-۳): مدل سامانه در گام آموزش و آزمون

الف) فرستنده ب) گیرنده

(Figure-3): system model in train and test phases

a) transmitter b) receiver

۴- آنالیز روش پیشنهادی آشکارسازی به‌کمک تقریب کسر گویا

در روش پیشنهادی دو مرحله آموزش و آزمون وجود دارد که در ادامه دو مرحله تشریح شده‌است. در ابتدا تعدادی بیت صفر و یک را به‌صورت تصادفی تولید می‌کنیم که در اینجا تعداد پانصد تا صفر و یک را تولید کردیم؛ سپس آنها را به‌وسیلهٔ مدولاسیون ASK/FSK مدوله می‌کنیم؛ سپس سیگنال مدوله‌شده وارد کانال AWGN می‌شود.

در گیرنده سیگنال آغشته به نوفه را دریافت و در هر بازه زمانی ارسالی بیت (Bit interval) نمونه می‌گیریم. به هر مجموعه N تایی نمونه‌ها یک منحنی کسر گویا با درجه L و M برازش می‌کنیم. هیستوگرام تمام ضرایب صورت که L+1 تا و مخرج M تا را برای دو رده مختلف صفر و یک به‌طور مجزا رسم می‌کنیم. برای هر کدام از هیستوگرام‌ها (ضریب‌های یک رده) بررسی می‌کنیم که کدام ضریب قابلیت تفکیک کامل دو رده را دارد و آنها را ذخیره می‌کنیم؛ علاوه‌بر آن با مقایسه هیستوگرام‌هایی که قابلیت تفکیک دو رده را دارند، می‌توان مرز تصمیم‌گیری را تعیین کرد؛ لذا تمام هیستوگرام‌هایی را که در آنها با تقریب خوبی تفکیک وجود دارد، همراه با مرز تصمیم‌گیری‌شان مشخص می‌کنیم و جدول مربوط به تفکیک L و M های مختلف را تشکیل می‌دهیم. داده‌هایی که هیستوگرام آنها را ترسیم می‌کنیم، داده‌های آموزشی هستند؛ سپس جهت آنالیز و بررسی کارایی روش پیشنهادی برازش منحنی مجموعه‌ای از صفر و یک‌های تولید شده در مرحله آزمون وارد مودولاتور ASK/FSK شده و پس از عبور از کانال در گیرنده نمونه‌برداری شده و با برازش خم اعمال‌شده به آن ضرایب تابع کسر گویا برازش شده به‌ازای L و M های مختلفی که در گام آموزش به‌دست آمده‌بودند، محاسبه می‌شوند؛ سپس با مقایسه این ضرایب با مرز تصمیم‌گیری به‌دست‌آمده در تفکیک بین دو رده در مرحله آموزش، نسبت به انتخاب رده سیگنال دریافتی تصمیم‌گیری می‌شود.

۴-۱- شبیه‌سازی

در ابتدا مدولاسیون دودویی شیفت فرکانسی را در سامانه مد نظر قرار دادیم. بدین صورت که در نرم افزارمتلب یک دنباله تصادفی پانصدتایی از صفر و یک تولید ، سپس

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/jsdp.19.4.3]

دنباله ورودی را در FSK با فرکانس‌های F1=500 وF2=F1+freqSep مدوله شیفت فرکانسی اعمال کردیم که فاصله فرکانسی برابر freqSep=500 است.

در مدولاسیون ASK نیز به‌طور مشابه یک دنباله تصادفی پانصدتایی از صفر و یک تولید کردیم و بیت‌های صفر و یک را به نگاشتی با سیگنال سینوسی با دامنه‌های ۵ و ۵- اعمال کردیم.

سیگنال‌های مدوله‌شده FSK و ASK در کانال به نوفه آغشته می‌شوند، کانال را نوفه گوسی جمع‌شونده AWGN در نظر گرفته‌ایم. در گیرنده سیگنال آغشته به نوفه را در هر بازه زمانی بیت (bit interval) دریافت می‌کنیم. به هر مجموعهN تایی نمونه‌ها یک منحنی کسر گویا با درجه L و M برازش می‌کنیم. هیستوگرام تمام ضرایب صورت که L+1 تا و مخرج Mتا را برای دو رده مختلف صفر و یک به‌طور مجزا رسم می‌کنیم. برای هر کدام از هیستوگرام‌ها (ضریب‌های یک رده) می‌بینیم کدام ضریب بیشترین فاصله را دارد و ذخیره می‌کنیم. برای همه ضریب‌های به‌دست‌آمده جدولی از L و Mهای مختلف به‌دست‌آمده را براساس آن ضریبی که بیشترین فاصله را بین دو رده ایجاد می‌کند، تشکیل و مرتب می‌کنیم. توجه کنید که داده‌هایی که هیستوگرام آنها را می‌کشیم، داده‌های آموزش هستند.

با رسم نمودار هیستوگرام ضرایب نمونه‌های صفر و یک‌ها را مشاهده کردیم که گستردگی متفاوت را با یکدیگر داشتند. حتی در بعضی از L و M ها ضرایب به‌طور کامل تفکیک شدند؛ همچنین جهت آنالیز ضرایب در هر یک از L و Mها با تعیین مرز تفکیک ضرایب، جدولی را تشکیل دادیم که در این جدول احتمال خطا و صحت را در مرحله آزمون محاسبه خواهیم کرد.

در مرحله دوم یعنی مرحله آزمون سیگنالی با دنباله‌ای به طول ۵۰۰ از ۰ و ۱ را تولید و مدوله متناظر BFSK یا BASK می‌کنیم. آنگاه با عبور از کانال AWGN از سیگنال دریافتی آغشته به نوفه نمونه‌برداری کرده یک منحنی کسر گویا با درجه L و M برازش می‌کنیم.

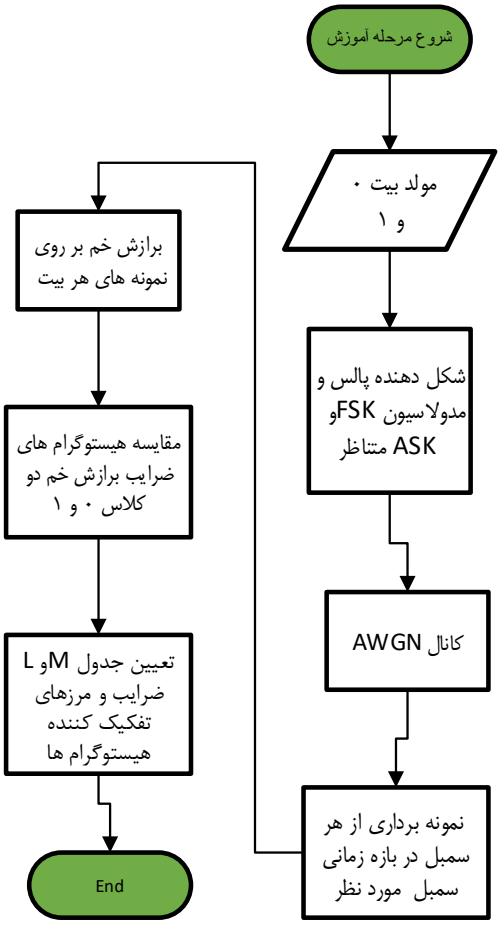
با مراجعه به جدول ضرایب L و M و مرزهای تفکیک‌شده در ضرایب مطلوب به‌دست‌آمده در گام آموزش، ضرایب به‌دست‌آمده از مرحله آزمون را جهت آشکارسازی سیگنال‌های ارسالی فرستنده به کار می‌بریم.

در حقیقت ضرایبی از مرحله آزمون را انتخاب می‌کنیم که در مرحله آموزش با L و M مشخص به‌دست آمده‌بودند.

با مقایسه ضرایب تعیین‌شده در مرحله آزمون با مرزهای تصمیم‌گیری معادل در مرحله آموزش در خصوص تعیین سمبل‌ها تصمیم‌گیری صورت می‌پذیرد.

در نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی دو معیار نرخ نمونه‌برداری از سمبل‌ها و میزان سیگنال به نوفه سیگنال ارسالی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

الف) مرحله آموزش



باتوجه به اینکه نتایج به‌دست‌آمده در سیگنال به نوفه‌های بسیار پایین نیز قابل قبول بوده و تعداد هیستوگرام ضرایب زیاد است، به‌ناچار در بعضی موارد فقط به جدولی شامل تعداد ضرایب تفکیک‌کننده بسنده شده‌است. در ادامه روند نمای چگونگی انجام مراحل مختلف آموزش و آزمون در شکل (۴) آمده است.

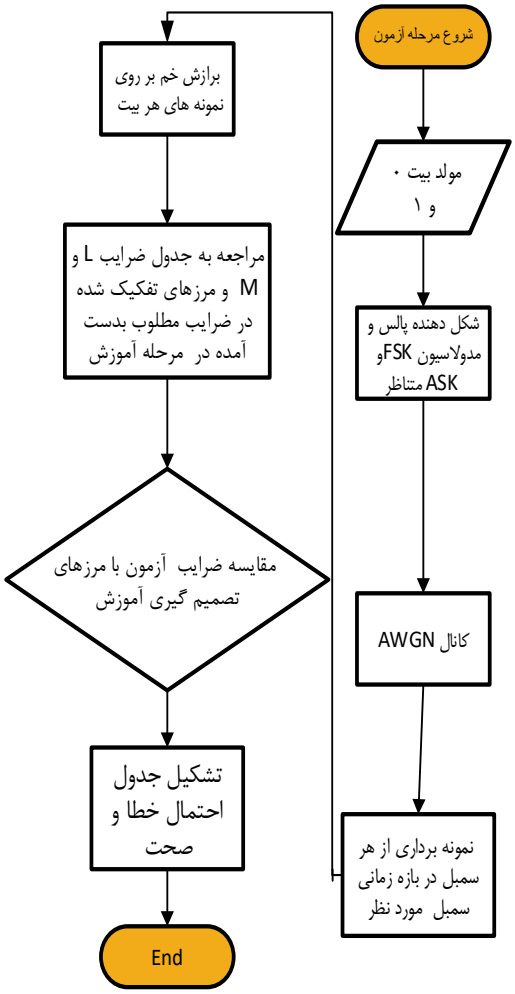
در کلیه نتایج به‌دست‌آمده مقادیر L,M به‌صورت زیر در نظر گرفته‌شده‌اند:

$$L+M+1=nf\ ;\ 4 \le nf \le 10$$

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.61186/jsdp.19.4.3]

با توجه به تعدد ضرایب در ادامه ضرایبی از برازش خم در مدولاسیون‌های FSK و ASK را با تفکیک کامل از یکدیگر بررسی می‌کنیم.

الف) مرحله آزمون



(شکل-۴): روندنمای مراحل مختلف آموزش و آزمون در روش پیشنهادی

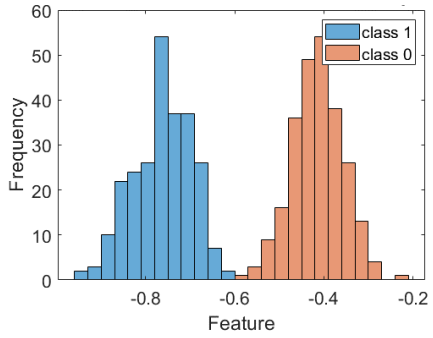
(Figure-4): block diagram of train and test phases in proposed method

۴-۲- نتایج شبیه‌سازی در مدولاسیون FSK دودویی

نتایج شبیه‌سازی با مقادیر مختلف سیگنال به نوفه و نرخ نمونه‌برداری آمده است

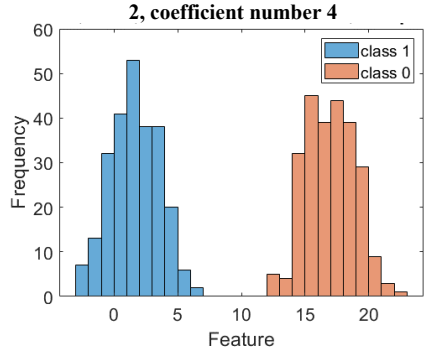
الف) SNR=-15dB و **نرخ نمونه برداری** N=12500

تعداد کل هیستوگرام ها در این حالت ۹ مورد بوده که در اینجا چهار مورد از آنها نمایش داده شده‌است.



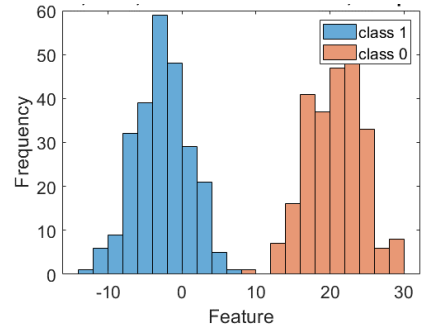
(شکل-۵): هیستوگرام ضرایب صفر و یک با L=1,M=2, شماره ضریب ۴

(Figure-5): Histogram of coefficients 0 and 1 with L = 1, M = 2, coefficient number 4



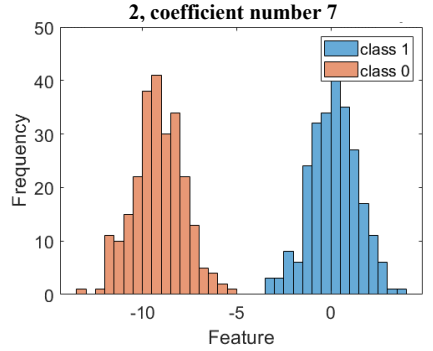
(شکل-۶): هیستوگرام ضرایب صفر و یک با L=3, M=1 و شماره ضریب ۴

(Figure-6): Histogram of coefficients 0 and 1 with L = 3, M = 1, coefficient number 4



(شکل-۷): هیستوگرام ضرایب صفر و یک با L=4, M=2 و شماره ضریب ۷

(Figure-7): Histogram of coefficients 0 and 1 with L = 4, M = 2, coefficient number 7



(شکل-۸): هیستوگرام ضرایب صفر و یک با L=3, M=0 و شماره ضریب ۲

(Figure-8): Histogram of coefficients 0 and 1 with L = 3, M = 0, coefficient number 2

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/jsdp.19.4.3]

به‌کمک ضرایب به‌دست‌آمده در مرحله آموزش، پانصد سمبل در مرحله آزمون را جهت بررسی کارایی روش پیشنهادی مورد بررسی قرار داده‌ایم که نتایج آن در جدول (۱) آمده است. تعداد بیت‌هایی که به‌درستی آشکارسازی شده‌اند، بیان‌گر میزان قدرت آشکارسازی در انتخاب تعداد ضرایب صورت و مخرج منحنی برازش خم کسر گویا و انتخاب ضریب مورد نظر در تفکیک سمبل‌ها است.

ب) SNR=-9dB و نرخ نمونه‌برداری برابر N=12500

تعداد بیت‌های پانصد از پانصد سمبل ارسالی که به‌درستی آشکارسازی شده‌اند، کارایی روش پیشنهادی را نشان‌می‌دهد. همان‌گونه که انتظار داریم با مقایسه با حالت الف مشاهده می‌شود که با افزایش سیگنال به نوفه تعداد ضرایب تفکیک‌کننده افزایش یافته‌است.

(جدول-۱): صحت سمبل‌های دریافتی از ۵۰۰ سمبل ارسالی با SNR=-15dB و نرخ نمونه‌برداری N=12500

(Table-1): number of accuracy for 500 transmitted symbols with SNR=-15dB and sampling rate N=12500

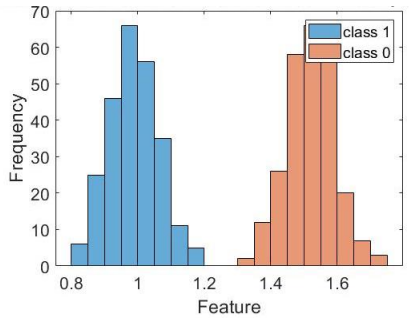
ردیف	L	M	شماره ضریب	صحت
1	3	0	2	500
2	3	1	4	500
3	4	2	7	500
4	4	2	6	500
5	5	3	9	500
6	3	1	3	499
7	3	1	5	499
8	4	0	5	499
9	1	2	4	498

(جدول-۲): صحت سمبل‌های دریافتی از ۵۰۰ سمبل ارسالی با SNR=-9dB و نرخ نمونه‌برداری N=12500

(Table-2): number of accuracy for 500 transmitted symbols with SNR=-9dB and sampling rate 12500

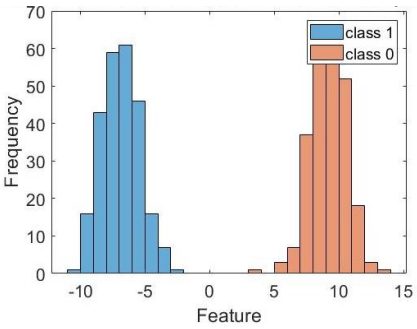
ردیف	L	M	شماره ضریب	صحت
1	0	3	4	500
2	1	2	4	500
3	1	2	3	500
4	3	0	1	500
5	3	0	3	500
6	3	0	2	500
7	3	1	4	500
8	3	1	3	500
9	3	1	5	500
10	4	0	4	500
11	4	0	3	500
12	4	0	5	500
13	2	3	5	500
14	2	3	6	500
15	3	2	6	500
16	4	2	5	500
17	4	2	7	500
18	3	4	8	500
19	3	4	7	500
20	4	5	10	500
21	2	1	2	499
22	2	1	4	499
23	4	2	4	499
24	4	2	6	499
25	5	3	6	499
26	5	3	8	499
27	5	3	7	499
28	5	3	9	499
29	5	1	5	498
30	5	1	7	498
31	5	1	6	498

در ادامه هیستوگرام چهار نمونه از ۳۱ مورد ضرایب صورت و مخرج (L,M) از صفر و یک‌ها که در جدول(۲) آمده است. در این هیستوگرام‌های ضرایب، تفکیک کامل مشاهده می‌شود.



(شکل-۹): هیستوگرام ضرایب صفر و یک با L=3, M=0 , شماره ضریب ۱

(Figure-9): Histogram of coefficients 0 and 1 with L = 3, M = 0, coefficient number 1

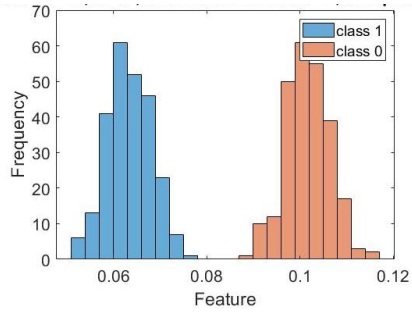


(شکل -۱۰): هیستوگرام ضرایب صفر و یک با L=3, M=0 و شماره ضریب ۳

(Figure-10): Histogram of coefficients 0 and 1 with L = 3, M = 0, coefficient number 3

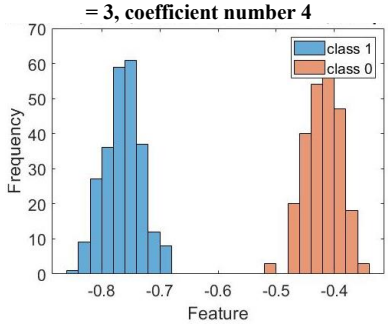
[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/jsdp.19.4.3]



(شکل-۱۱): هیستوگرام ضرایب صفر و یک با L=0, M=3 و شماره ضریب ۴

(Figure-11): Histogram of coefficients 0 and 1 with L = 0, M = 3, coefficient number 4



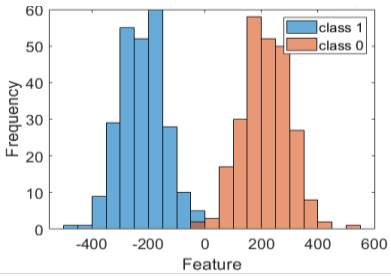
(شکل-۱۲): هیستوگرام ضرایب صفر و یک با L=1, M=2 و شماره ضریب ۴

(Figure-12): Histogram of coefficients 0 and 1 with L = 1, M = 2, coefficient number 4

۴-۳- نتایج شبیه‌سازی در مدولاسیون ASK دودویی

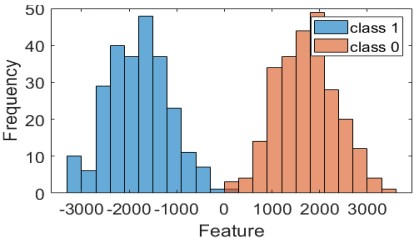
الف) SNR=-25dB و نرخ نمونه‌برداری N=1500

تعداد هیستوگرام‌ها با تفکیک کامل ضرایب ۵ مورد بوده که در اشکال زیر ۴ مورد به‌عنوان نمونه آورده شده‌است:



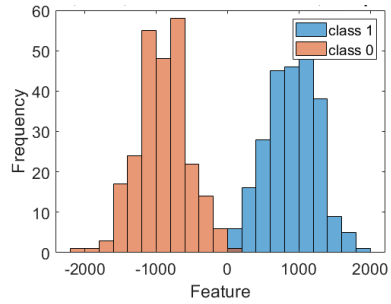
(شکل-۱۳): هیستوگرام ضرایب صفر و یک با L=6,M=1, شماره ضریب ۳

(Figure-13): Histogram of coefficients 0 and 1 with L = 6, M = 1, coefficient number 3



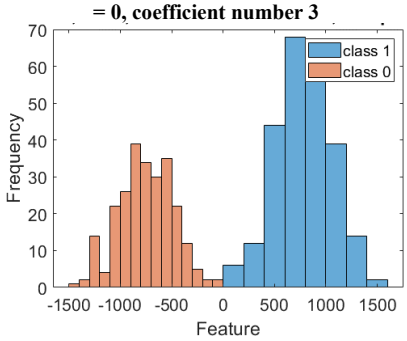
(شکل-۱۴): هیستوگرام ضرایب صفر و یک با L=5, M=1 و شماره ضریب ۵

(Figure-14): Histogram of coefficients 0 and 1 with L = 5, M = 1, coefficient number 5



(شکل-۱۵): هیستوگرام ضرایب صفر و یک با L=5, M=0 و شماره ضریب ۳

(Figure-15): Histogram of coefficients 0 and 1 with L = 5, M = 0, coefficient number 3



(شکل-۱۶): هیستوگرام ضرایب صفر و یک با L=5, M=1 و شماره ضریب ۴

(Figure-16): Histogram of coefficients 0 and 1 with L = 5, M = 1, coefficient number 4

در اینجا نیز به‌کمک ضرایب به‌دست‌آمده در مرحله آموزش، پانصد سمبل در مرحله آزمون را جهت بررسی کارایی روش پیشنهادی مورد بررسی قرار داده‌ایم که نتایج آن در جدول (۴) آمده است. در مقایسه با مدولاسیون FSK در قسمت ۲-۳-الف برخلاف سیگنال به نوفه به‌مراتب پایین‌تر، تعداد پنج مورد از حالت‌های تفکیک‌کننده سمبل‌ها وجود دارد.

(جدول-۴): صحت سمبل‌های دریافتی از ۵۰۰ سمبل ارسالی با SNR=-25dB و نرخ نمونه برداری N=1500

(Table-4): number of accuracy for 500 transmitted symbols with SNR=-25dB and sampling rate N=1500

ردیف	L	M	شماره ضریب	صحت
1	5	1	5	500
2	5	1	4	500
3	6	1	3	500
4	5	0	3	497
5	5	1	5	500

ب) SNR=-23dB و نرخ نمونه برداری N=1500

تعداد هیستوگرام‌ها با تفکیک کامل ضرایب ۵۴ مورد بوده که در اشکال زیر چهار مورد به‌عنوان نمونه آورده شده‌است:

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-11-13]

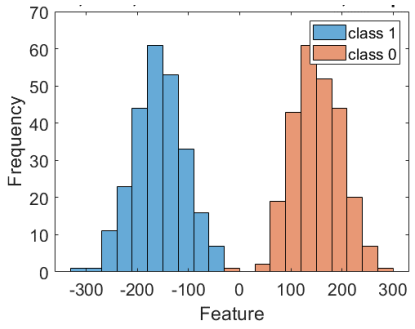
[DOI: 10.61186/jsdp.19.4.3]

در اینجا نیز به‌کمک ضرایب به‌دست‌آمده در مرحله آموزش، پانصد سمبل در مرحله آزمون را جهت بررسی کارایی روش پیشنهادی مورد بررسی قرار داده‌ایم که نتایج آن در جدول (۵) آمده است. در مقایسه با حالت الف مشاهده می‌شود که با افزایش اندکی در سیگنال به نوفه از -25dB به -23dB تعداد ضرایب تفکیک‌کننده افزایش پیدا کرده است؛ همچنین در مقایسه با مدولاسیون FSK در قسمت ۳-۲-الف برخلاف سیگنال به نوفه کمتر، تعداد حالت‌های تفکیک‌کننده سمبل‌ها، افزایش پیدا کرده است.

(جدول-۵): صحت سمبل‌های دریافتی از ۵۰۰ سمبل ارسالی با SNR=-23dB و نرخ نمونه‌برداری N=1500

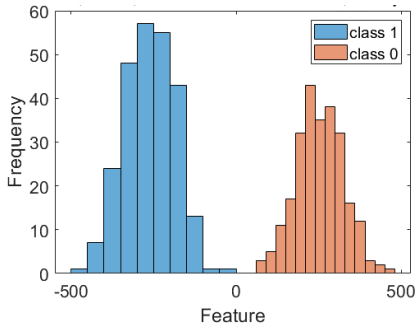
(Table-5): number of accuracy for 500 transmitted symbols with SNR=-23dB and sampling rate N=1500

ردیف	L	M	شماره ضریب	صحت
1	0	6	7	500
2	4	2	6	500
3	4	2	5	500
4	4	2	7	500
5	5	1	3	500
6	5	1	5	500
7	5	1	7	500
8	5	1	2	500
9	5	1	4	500
10	5	1	6	500
11	6	0	2	500
12	6	0	4	500
13	6	0	1	500
14	6	0	3	500
15	5	2	3	500
16	5	2	5	500
17	5	2	7	500
18	1	5	7	500
19	1	5	6	500
20	3	3	7	500
21	4	2	4	500
22	1	6	7	500
23	6	1	3	500
24	6	1	2	500
25	6	1	4	500
26	1	7	9	500
27	1	7	8	499
28	2	6	7	499
29	5	3	5	499
30	6	2	4	499
31	6	2	3	499
32	7	1	2	499
33	5	0	2	498
34	1	6	8	498
35	5	2	4	498
36	5	2	6	498
37	5	2	8	498
38	2	6	8	498
39	0	5	6	497
40	5	0	1	497
41	0	7	8	497
42	4	3	5	497
43	4	3	7	497
44	4	3	6	497
45	4	3	8	497
46	2	6	9	497



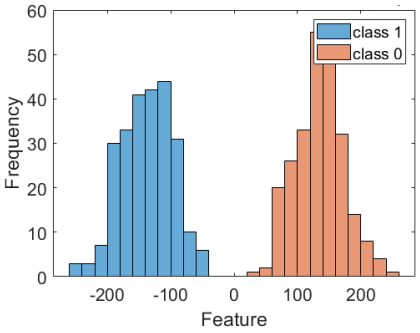
(شکل-۱۷): هیستوگرام ضرایب صفر و یک با L=5, M=0, شماره ضریب ۲

(Figure-17): Histogram of coefficients 0 and 1 with L = 5, M = 0, coefficient number 2



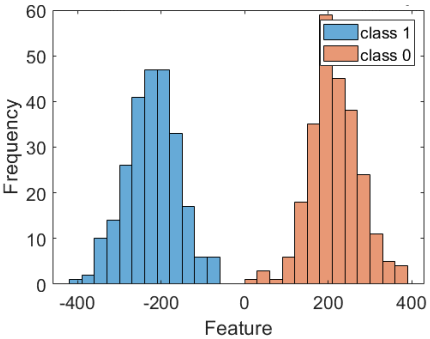
(شکل-۱۸): هیستوگرام ضرایب صفر و یک با L=6, M=0, شماره ضریب ۲

(Figure-18): Histogram of coefficients 0 and 1 with L = 6, M = 0, coefficient number 2



(شکل-۱۹): هیستوگرام ضرایب صفر و یک با L=5, M=1, شماره ضریب ۳

(Figure-19): Histogram of coefficients 0 and 1 with L = 5, M = 1, coefficient number 3



(شکل-۲۰): هیستوگرام ضرایب صفر و یک با L=6, M=1, شماره ضریب ۳

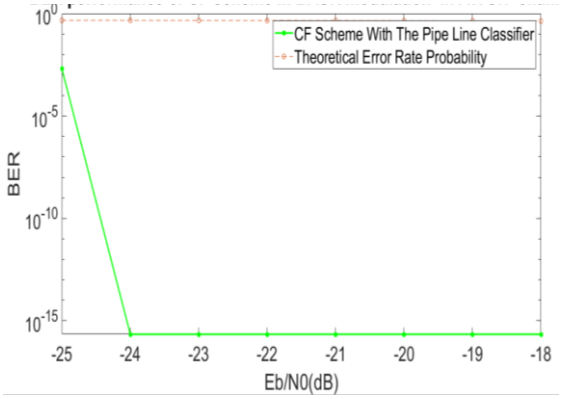
(Figure-20): Histogram of coefficients 0 and 1 with L = 6, M = 1, coefficient number 3

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/jsdp.19.4.3]

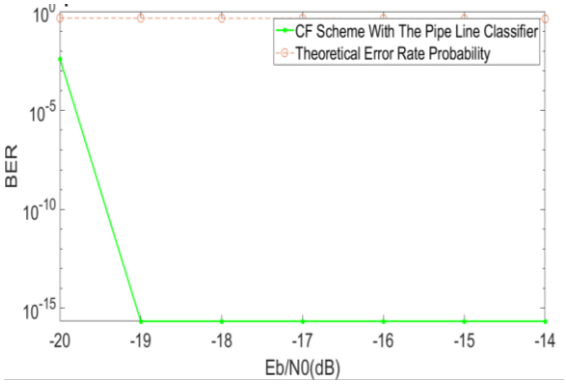
ردیف	L	M	شماره ضریب	صحت
47	7	2	3	497
48	2	5	7	496
49	2	5	6	496
50	2	5	8	496
51	7	0	1	496
52	3	5	6	495
53	5	3	4	495
54	5	3	6	495

همچنین جهت مقایسه کارایی روش پیشنهادی با روش احتمال خطای تئوری، نمودار شبیه‌سازی مقایسه بین دو روش در اشکال ۲۱ و ۲۲ آمده است.



(شکل-۲۱): مقایسه کارایی روش پیشنهادی با روش تئوری در مدولاسیون BASK

(Figure-21): The performance of the proposed scheme and the theoretical error rate probability scheme in BASK

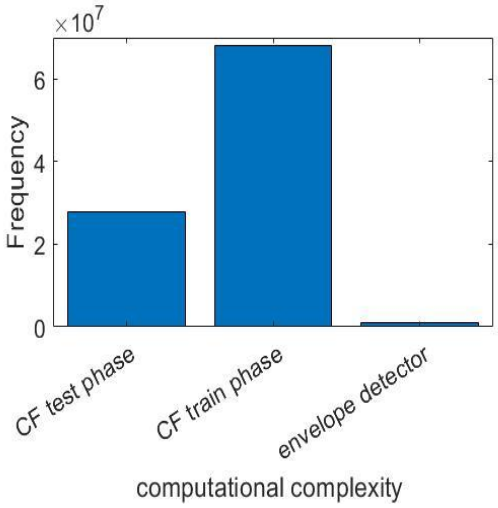


(شکل-۲۲): مقایسه کارایی روش پیشنهادی با روش تئوری در مدولاسیون BFSK

(Figure-22): The performance of the proposed scheme and the theoretical error rate probability scheme in BFSK

۵- پیچیدگی محاسباتی

در ادامه پیچیدگی محاسباتی روش پیشنهادی با روش آشکارساز پوش مقایسه می‌شود. بدین‌منظور تمامی اعمال ضرب و جمع به‌کاررفته در آشکارساز برازش خم با روش متداول آشکارساز پوش در نرخ نمونه‌برداری N=1500,12500 با یکدیگر مقایسه می‌شوند. همان‌گونه که در هیستوگرام (شکل ۲۳) مشاهده می‌کنید، روش پیشنهادی، محاسبات بیشتری در مقایسه با روش‌های متداول همچون آشکارساز پوش دارد، به‌خصوص در فاز آموزش که استخراج مقادیر مناسب L و M با مقداردهی مقادیر مختلف به آنها و مقایسه ضرایبی که قابل تفکیک دو رده را دارند، با محاسبات بیشتری صورت می‌پذیرد.



(شکل-۲۳): هیستوگرام مقایسه میزان پیچیدگی روش پیشنهادی و روش آشکارساز پوش

(Figure-23): Computational complexity of the proposed detector and envelope detector

۶- نتیجه‌گیری

در طرح برازش خم یک روش جدید آشکارسازی سیگنال‌های مخابراتی مبتنی بر برازش منحنی و تقریب ضرایب کسر گویا ارائه گردید. کارایی این روش به‌کمک نتایج شبیه‌سازی نشان داده شد که این نتایج گویای عملکرد و کارایی بیشتر روش پیشنهادی است. همچنین نتایج نشان‌می‌دهد که با افزایش سیگنال به نوفه، تعداد ضرایب تفکیک‌کننده به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد.

علاوه بر این، کارایی روش پیشنهادی با روش محاسبه احتمال خطای تئوری بر حسب سیگنال به نوفه‌های مختلف در مدولاسیون FSK و ASK مقایسه شد که نتایج شبیه‌سازی بیان‌گر برتری روش پیشنهادی است. در نمودارها از یک سیگنال به نوفه به‌بعد احتمال خطای روش پیشنهادی برازش خم صفر می‌شود. به‌ویژه در مدولاسیون ASK که نوفه کانال گوسی جمع‌شونده غالب و قدرت تخریبی بیشتری دارد، روش پیشنهادی برازش خم کسر، گویا عملکرد مطلوب‌تری داشته است.

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/jsdp.19.4.3]

۷- مراجع 7- References

[1] T. S. Rappaport, Wireless communications: Principles and practice,2nd ed. Prentice Hall, 2002.

[2] R. M. Gagliardi and S. Karp, Optical communications, 2nd ed. Wiley,1995.

[3] H. Meyr, M. Moeneclaey, and S. A. Fechtel, Digital communication receivers: Synchronization, channel estimation, and signal processing. John Wiley & Sons, Inc., 1998.

[4] T. Schenk, RF imperfections in high-rate wireless systems: Impact and digital compensation. Springer Science & Business Media, 2008.

[5] J. Proakis and M. Salehi, Digital Communications, 5th ed. McGraw-Hill Education, 2007.

[6] A. Goldsmith, Joint source/channel coding for wireless channels, in Proc. IEEE Vehicular Technol. Conf., vol. 2, 1995, pp. 614–618.

[7] E. Zehavi, 8-PSK trellis codes for a Rayleigh channel, IEEE Trans.Commun., vol. 40, no. 5, pp. 873–884, 1992.

[8] H. Wymeersch, Iterative receiver design. Cambridge University Press,2007, vol. 234.

[9] K. Hornik, M. Stinchcombe, and H. White, Multilayer feedforward networks are universal approximators, Neural networks, vol. 2, no. 5, 1989,pp. 359–366.

[10] S. Reed and N. de Freitas, Neural programmer-interpreters, arXiv preprint, 2015, arXiv: 1511.06279.

[11] H. T. Siegelmann and E. D. Sontag, On the computational power of neural nets, in Proc. 5th Annu. Workshop Computational Learning Theory. ACM, 1992, pp. 440–449.

[12] V. Vanhoucke, A. Senior, and M. Z. Mao, Improving the speed of neural networks on CPUs, in Proc. Deep Learning and Unsupervised Feature Learning NIPS Workshop, 2011.

[13] Y.-H. Chen, T. Krishna, J. S. Emer, and V. Sze, Eyeriss: An energyefficient reconfigurable accelerator for deep convolutional neural networks, IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 52, no. 1, 2017 pp. 127–138,.

[14] R. Raina, A. Madhavan, and A. Y. Ng, Large-scale deep unsupervised learning using graphics processors, in Proc. Int. Conf. Mach. Learn.(ICML). ACM, 2009, pp. 873–880.

[15] A. Atieg, G.A. Watson, " A class of methods for fitting a curve or surface to data by minimizing the sum of squares of orthogonal distances", Journal of Computational and Applied Mathematics 158 2003 277–296, doi:10.1016/S0377-0427(03)00448-5

[16] Mostafa Ghazizadeh Ahsaee, Hadi Sadoghi Yazdi, Mahmoud Naghibzadeh, " Curve fitting space for classification", Neural Comput & Applic 2011 20:273–285 DOI 10.1007 / s00521-010-0383-7

[17] Maryam Haddadi, Maliheh Ahmadi, Mohammad Reza Keyvanpour, and Noushin Riahi" Using Curve Fitting in Error Correcting Output Codes" Journal of Soft Computing and Information Technology (JSCIT), 2016, Vol. 5, No. 1

[18] Seyed Abolfazl Hosseini, Hassan Ghassemian, " Rational function approximation for feature reduction in hyperspectral data " Taylor & Francis, Remote Sensing Letters, 2016 ,Volume 7, Issue 2, Pages 101-110.

[19] Mersedeh Beitollahi, S Abolfazl Hosseini, " Using Savitsky-Golay filter and interval curve fitting in order to hyperspectral data compression ", IEEE, Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Pages 1967-1972 , 2017

[20] Maryam Hamidi, Hassan Ghassemian∗, Maryam Imani " Classification of heart sound signal using curve fitting and fractal dimension" Elsevier, Biomedical Signal Processing and Control 39, 2018 ,351–359

[21] Yazan A. Alqudah, " Path Loss Modeling Based on Field Measurements Using Deployed 3.5GHzWiMAX Network " Springer Science+Business Media, LC, Wireless Pers Commun , 2012,DOI 10.1007/s11277-012-0612-8 Path.

[22] HARRY L. VAN TREES, KRISTINE L. BELL, with ZHI TIAN, " Detection, Estimation, and Modulation Theory Part I: Detection, Estimation, and Filtering Theory Second Edition ", John Wiley & Sons, Inc. 2013



حمید نوراللهی دانش‌آموخته کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق مخابرات از دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) شهرری است. وی هم اکنون دانشجویی دکترای برق مخابرات در همان واحد دانشگاه آزاد است. همچنین ایشان به‌عنوان کارشناس رسمی دادگستری مشغول به فعالیت هستند. زمینه‌های پژوهشی فعلی ایشان شبکه‌های عصبی، یادگیری عمیق و پردازش سیگنال‌های مخابراتی و پردازش تصویر است.

نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

h_nourollahi@yahoo.com

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/jsdp.19.4.3]



سید ابوالفضل حسینی تحصیلات کارشناسی مهندسی برق کنترل را در دانشگاه صنعتی شریف و کارشناسی‌ارشد مهندسی برق مخابرات را در دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیر به پایان رساند. همچنین ایشان مقطع دکترای برق مخابرات را در دانشگاه تربیت مدرس به پایان رساند. ایشان عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام‌خمینی (ره) است. زمینه‌های پژوهشی ایشان مباحثی نظیر بازشناسی الگو، پردازش تصویر، مهندسی سنجش از دور، پردازش گفتار و فیلترهای وفقی را در بر می‌گیرد.

نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

abolfazl.hosseini@modares.ac.ir



علی شهزادی فارغ‌التحصیل سال ۱۳۸۶ مهندسی برق در گرایش مخابرات سامانه از دانشگاه علم و صنعت ایران است. ایشان از سال ۱۳۸۸ تاکنون به‌عنوان عضو هیئت‌علمی، از سال ۱۳۹۴ تاکنون عضو کمیته جذب گروه مخابرات و عضو کمیته بازنگری سرفصل دروس دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه سمنان بوده و با آن دانشگاه همکاری داشته و در حال حاضر نیز معاون آموزشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه سمنان هستند. همچنین ایشان در گذشته عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) شهرری بوده‌اند. زمینه‌های پژوهشی ایشان عبارتند از: تخمین و آشکارسازی، هوش‌مصنوعی و یادگیری عمیق، سامانه‌های مخابرات پهن‌باند، روش‌های بهینه‌سازی، شبکه‌های مخابرات بی‌سیم و سیار

نشانی رایانامه ایشان عبارتند از:

shahzadi@semnan.ac.ir



رامین شقاقی کندوان تحصیلات کارشناسی مهندسی الکترونیک را در دانشگاه تهران و کارشناسی‌ارشد و دکتری مهندسی برق مخابرات را در دانشگاه آزاد اسلامی به پایان رساند. ایشان عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام (ره) است. زمینه‌های پژوهشی ایشان در زمینه‌های بهینه‌سازی شبکه، یادگیری عمیق، شبکه‌های مخابرات بی‌سیم می‌باشد.

نشانی رایانامه ایشان عبارتند از:

ramin.shaghaghi@gmail.com

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/jsdp.19.4.3]