استخراج ویژگی‌های نوین برای طبقه‌بندی مدولاسیون با استفاده از یک دمدولاتور 8PSK

محسن فرهنگ*، حسین بهرامگیری و حمید دهقانی
مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله یک الگوریتم طبقه‌بندی مدولاسیون مبتنی بر ویژگی برای جداسازی سیگنال‌های PSK ارائه شده است. مدولاسیون‌های نامزد شامل QPSK، OQPSK، π/4DQPSK و 8PSK در نظر گرفته شده‌اند. روش ارائه‌شده برای استخراج ویژگی‌های مورد نظر از روی نمادهای مشاهده‌شده، از یک دمدولاتور باند پایه 8PSK استفاده می‌کند. خروجی دمدولاتور به صورت یک ماشین حالت محدود در نظر گرفته می‌شود که به‌ازای هر یک از مدولاسیون‌های نامزد، حالت‌ها و تغییر حالت‌های متفاوتی دارد. تخمین احتمال برخی تغییر حالت‌های مشخص، ویژگی‌های متمایزکننده مدولاسیون‌های نامزد را پدید می‌آورند. ویژگی‌های به‌دست‌آمده به یک طبقه‌بندی‌کنندهٔ بیزی داده می‌شوند که درباره نوع مدولاسیون سیگنال دریافتی تصمیم‌گیری می‌کند. با انجام شبیه‌سازی‌های متعدد، احتمال طبقه‌بندی صحیح در شرایط مختلف نسبت توان سیگنال به نوفه و با تعداد مختلف نمادهای مشاهده‌شده محاسبه شده است. نتایج این شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های موجود، طبقه‌بندی دقیق‌تری ارائه می‌دهد.

واژگان کلیدی: طبقه‌بندی خودکار مدولاسیون، استخراج ویژگی، شناسایی الگو، نسخه‌های تغییریافته QPSK، طبقه‌بندی‌کنندهٔ بیزی.

۱- مقدّمه

طبقه‌بندی خودکار مدولاسیون[1] را می‌توان به‌عنوان فرآیند شناسایی کور نوع مدولاسیون یک سیگنال دریافتی تعریف کرد. در قالب گیرنده‌های هوشمند، طبقه‌بندی خودکار مدولاسیون به‌عنوان مرحلهٔ میانی، بین زیرسامانه‌های کشف سیگنال و دمدولاسیون قرار دارد. در طی بیش از دو دهه، طبقه‌بندی خودکار مدولاسیون یک موضوع مهم در کاربردهای نظامی مانند جنگ الکترونیک و نظارت[2] بوده است. در سال‌های اخیر، با رشد محبوبیت رادیونرم‌افزاری و رادیوشناختگر[3]، طبقه‌بندی خودکار مدولاسیون در حال تبدیل‌شدن به یک فناوری مهم برای کاربردهای تجاری نظیر مدیریت طیف پویا و شناسایی تداخل است (رامکومار، ۲۰۰۹؛ هو، ۲۰۰۹).

اهمیت روزافزون رادیونرم‌افزاری باعث رشد و توسعه الگوریتم‌های طبقه‌بندی خودکار مدولاسیون شده است. مروری بر تکنیک‌های طبقه‌بندی خودکار مدولاسیون موجود را می‌توان در مقاله (دوبر، ۲۰۰۷) یافت. در حالت کلی دو رویکرد اصلی به مسالهٔ طبقه‌بندی خودکار مدولاسیون وجود دارد: رویکرد مبتنی بر احتمال[4] و رویکرد مبتنی بر ویژگی[5]. رویکرد مبتنی بر احتمال، مسالهٔ طبقه‌بندی خودکار مدولاسیون را به‌صورت یک مسالهٔ آزمون فرضیه‌های مرکب چندگانه فرمول‌بندی می‌کند که حل آن به نحوهٔ مدل‌کردن کمیت‌های مجهول بستگی دارد (حمید، ۲۰۰۹). این رویکرد بهینه است؛ اما معایبی نظیر پیچیدگی محاسباتی و حساسیت به جابه‌جایی فاز و فرکانس دارد. در مقابل، روش‌های طبقه‌بندی خودکار مدولاسیون با رویکرد مبتنی بر ویژگی، زیربهینه[6] اما ساده و مقاوم هستند (فلوبرگر، ۲۰۱۰).

[1] Automatic Modulation Classification
[2] Surveillance
[3] Cognitive Radio
[4] Likelihood-Based Approach
[5] Feature-Based Approach
[6] Suboptimum

روش‌های طبقه‌بندی خودکار مدولاسیون مبتنی بر ویژگی شامل دو مرحلهٔ استخراج ویژگی و طبقه‌بندی هستند. در مرحلهٔ استخراج ویژگی، یک یا چند ویژگی مانند کامولنت‌های دوری[1] (دوبر، ۲۰۱۲)، همبستگی طیفی (تنگ، ۲۰۰۸) و تبدیل ویولت (حسن، ۲۰۰۹) از سیگنال دریافتی استخراج می‌شوند. طبقه‌بندی‌کننده ویژگی‌های استخراج‌شده را به‌عنوان ورودی دریافت کرده و نوع مدولاسیون را با استفاده از الگوریتم‌های شناسایی الگو تخمین می‌زند. در مقالات با موضوع طبقه‌بندی خودکار مدولاسیون مبتنی بر ویژگی، روش‌های طبقه‌بندی متعددی پیشنهاد شده‌اند مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی (فرهنگ، ۲۰۱۱)، ماشین بردار پشتیبان[2] (قلعه، ۲۰۱۲)، الگوریتم ژنتیک (ژو، ۲۰۱۴) و یادگیری مبتنی بر تئوری اطلاعات (فونتس، ۲۰۱۵).

مدولاسیون‌های OQPSK[3] و π/4DQPSK[4] دو نسخهٔ پرکاربرد تغییریافته QPSK هستند که برای محدودکردن مقدار تغییرات ناگهانی فاز حامل در QPSK ابداع شده‌اند و بیش‌تر در مخابرات ماهواره‌ای به‌کار می‌روند (ریچاری، ۲۰۱۴). این مدولاسیون‌ها به‌ندرت در مقالات طبقه‌بندی خودکار مدولاسیون، به‌عنوان مدولاسیون‌های نامزد[5] لحاظ شده‌اند (وسترام نایک، ۲۰۰۶؛ شن لی، ۲۰۰۶). در این مقاله با پیشنهاد یک الگوریتم طبقه‌بندی مدولاسیون مبتنی بر ویژگی، جداسازی مدولاسیون QPSK از OQPSK و همچنین π/4DQPSK از 8PSK مورد بررسی قرار گرفته است. ویژگی‌های پیشنهادی از طریق دمدولاسیون سیگنال دریافتی توسط یک دمدولاتور 8PSK استخراج می‌شوند. خروجی این دمدولاتور به‌صورت یک ماشین حالت متناهی[6] در نظر گرفته شده و نرخ برخی تغییر حالت‌های مشخص آن به‌عنوان ویژگی‌های متمایزکننده با نام‌های f180 و f90 پیشنهاد شده‌اند. با فرض توزیع گاوسی برای این ویژگی‌ها، از یک طبقه‌بندی‌کنندهٔ بیزی[7] برای مرحلهٔ شناسایی الگو استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که ویژگی‌های پیشنهادی این مقاله، باعث افزایش دقت طبقه‌بندی در مقایسه با روش‌های پیشین می‌شود.

ادامه این مقاله بدین صورت سازماندهی شده است: در بخش ۲ به تشریح مدل سیگنال و مدولاسیون‌های نامزد پرداخته شده است. ویژگی‌ها و طبقه‌بندی‌کننده پیشنهادی در بخش ۳ معرفی شده‌اند. در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی‌ها ارائه و تحلیل شده‌اند و در بخش ۵ به نتیجه‌گیری و جمع‌بندی مقاله پرداخته شده است.

۲- مدل سیگنال

در این مقاله مدولاسیون‌های QPSK، OQPSK، π/4DQPSK و 8PSK به عنوان مدولاسیون‌های نامزد در نظر گرفته شده‌اند. در این بخش به تشریح این مدولاسیون‌ها و مدل سیگنال دریافتی پرداخته می‌شود. دنباله سیگنال دریافتی باند پایه $r(k)$ را می‌توان به‌صورت زیر نمایش داد:

$$r(k) = r_I(k) + jr_Q(k) = s(k) + n(k) \qquad (۱)$$
$$k = 1, \dots, N.$$

که در آن $s(k)$ معادل پایین‌گذر[8] نماد ارسالی k اُم، $n(k)$ نوفه سفید گاوسی جمع‌شونده مختلط[9] با متوسط صفر و N تعداد سمبل‌های دریافتی است. اندیس‌های I و Q بخش‌های هم‌فاز[10] (حقیقی) و متعامد[11] (موهومی) سیگنال دریافتی را مشخص می‌کنند. در ادامه مقاله با استفاده از هنجارسازی‌کردن، منظومه‌های سیگنال[12] با واریانس واحد در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین برای مدولاسیون کلیدزنی جابه‌جایی فاز (PSK)[13] نمادهای ارسالی بدون نوفه به‌صورت $s(k) = e^{j\theta_m};\ \theta_m \in \{2\pi m/M\,, m = 0, \dots, M-1\}$ داده می‌شوند.

مدولاسیون فاز یا PSK، مدولاسیونی رایج و پرکاربرد به‌ویژه برای پیوندهای ماهواره‌ای است؛ زیرا بر خلاف مدولاسیون دامنه، دارای پوش ثابت بوده و درنتیجه در برابر اعوجاج غیر خطی مقاوم است. اگرچه مدولاسیون فرکانس نیز دارای پوش ثابت است، اما بازده طیفی کمتری نسبت به مدولاسیون فاز دارد. در میان مدولاسیون‌های PSK، مدولاسیون QPSK از نظر مصالحه بین توان و پهنای باند بهینه بوده و به همین جهت از محبوبیت خاصی برخوردار است (مارال، ۲۰۰۹).

[1] Cyclic Cumulants
[2] Support Vector Machine
[3] Offset QPSK
[4] π/4 Differential QOSK
[5] Candidate
[6] Finite-State Machine
[7] Bayesian Classifier

[8] Low Pass Equivalent
[9] Additive White Gaussian Noise (AWGN)
[10] In-Phase
[11] Quadrature
[12] Signal Constellations
[13] Phase Shift Keying (PSK)

در مدولاسیون QPSK ولتاژهایی که دو حامل متعامد را مدوله می‌کنند، ممکن است به‌طور هم‌زمان تغییر کنند و باعث تغییرات فاز ۱۸۰ درجه‌ای حامل شوند (پروکیس، ۲۰۰۸). در برخی کاربردها مانند مخابرات ماهواره‌ای تغییرات فاز بزرگ باعث مدولاسیون دامنه حامل می‌شود. غیرخطی‌بودن کانال، باعث تبدیل این تغییرات دامنه به تغییرات فاز شده و دقت عملکرد دمدولاتور را کاهش می‌دهد. مدولاسیون‌های OQPSK و π/4DQPSK دو نسخه پرکاربرد تغییریافته QPSK هستند که برای محدودکردن مقدار تغییرات ناگهانی فاز حامل ابداع شده‌اند (مارال، ۲۰۰۹).

در مدولاسیون OQPSK جریان بیت‌های هم‌فاز I_k و متعامد Q_k به اندازه نصف دوره نماد نسبت به هم جابه‌جا شده‌اند. درنتیجه فاز حامل در هر دوره بیت تنها به اندازه ±۹۰ یا صفر درجه تغییر می‌کند و از تغییر فاز ۱۸۰ درجه جلوگیری می‌شود. این امر باعث کاهش تغییرات پوش ناشی از فیلترکردن حامل می‌شود (ویتاکر، ۲۰۱۴).

منظومه مدولاسیون OQPSK مشابه منظومه QPSK است. منظومه و تغییر فازهای ممکن در نمادهای متوالی برای مدولاسیون‌های QPSK و OQPSK به‌ترتیب در شکل‌های (۱ و ۲) نشان داده شده‌اند.

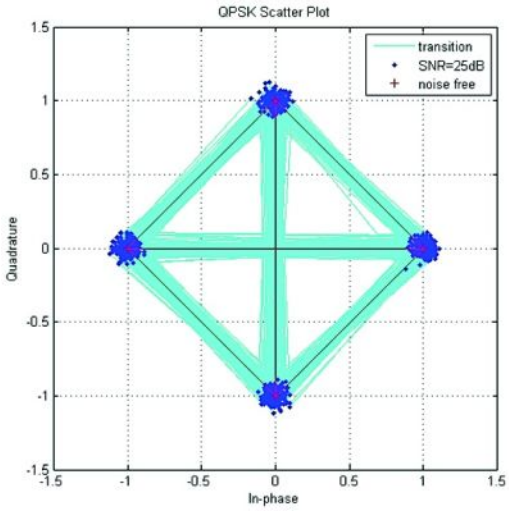
مدولاسیون π/4DQPSK روشی دیگر برای جلوگیری از تغییر فاز لحظه‌ای ۱۸۰ درجه است که از کدگذاری تفاضلی استفاده می‌کند. داده I_k و Q_k در زمان k اُم از روی دو بیت اطلاعات ورودی A_kB_k و دادهٔ قبلی I_{k-1} و Q_{k-1}، براساس تبدیل زیر تعیین می‌شوند:

$$\begin{pmatrix} I_k \\ Q_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_k & -sin\theta_k \\ sin\theta_k & cos\theta_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{k-1} \\ Q_{k-1} \end{pmatrix} \qquad (۲)$$

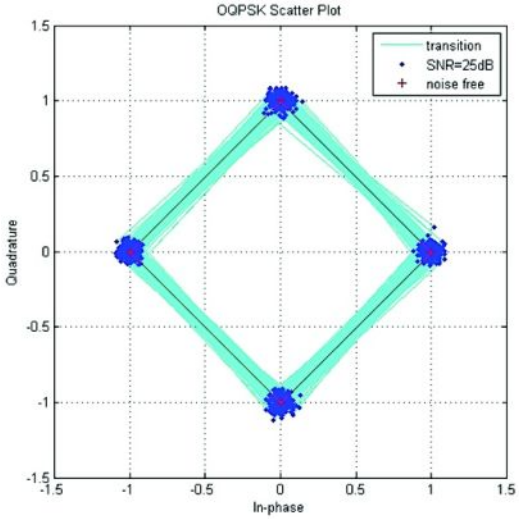
که در آن θ_k براساس دو بیت اطلاعات ورودی A_kB_k طبق جدول (۱) به‌دست می‌آید (مارال، ۲۰۰۹).

همان‌طور که در شکل‌های (۲ و۳) نشان داده شده است، منظومه مدولاسیون π/4DQPSK مشابه منظومه مدولاسیون 8PSK می‌باشد؛ با این تفاوت که تغییرات فاز ممکن برای π/4DQPSK تنها برابر ±۴۵ و ±۱۳۵ است.

با استفاده از روش‌های متداول برای طبقه‌بندی خودکار مدولاسیون که در مقالات ارائه شده‌اند، نمی‌توان جفت مدولاسیون‌های نامزد {QPSK & OQPSK} و همچنین {π/4DQPSK & 8PSK} را از یکدیگر تشخیص داد؛ زیرا نمودارهای منظومه سیگنال آنها مشابه هم هستند.



(شکل- ۱) : منظومه سیگنال و تغییر فازهای QPSK در SNR=20dB



(شکل- ۲) : منظومه سیگنال و تغییر فازهای OQPSK در SNR=20dB

(جدول- ۱) : تعیین θ_k براساس دو بیت اطلاعات ورودی A_kB_k

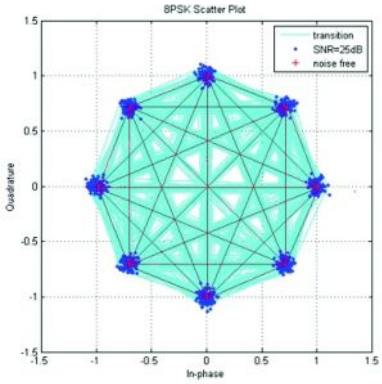
A_kB_k	00	01	10	11
θ_k	-3π/4	3π/4	-π/4	π/4

پیش از این در پژوهش‌های معدودی برای جداسازی این مدولاسیون‌ها فاز تفاضلی و فاصله نسبی سمبل‌های متوالی پیشنهاد شده‌اند (وسترام نایک، ۲۰۰۶؛ شن لی، ۲۰۰۶).

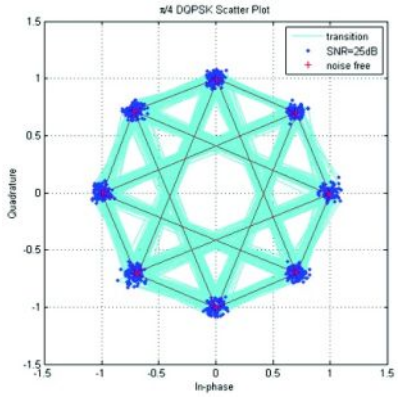
۳- طبقه‌بندی مدولاسیون

در این قسمت روش استخراج ویژگی‌های پیشنهادی تشریح می‌شود. سیگنال دریافتی با نوع مدولاسیون مجهول توسط

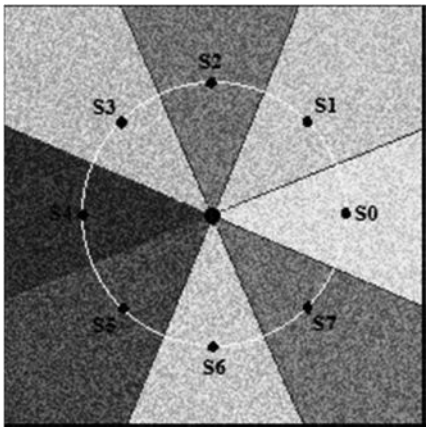
یک دمدولاتور 8PSK دمدوله می‌شود. مرزها و نواحی تصمیم این دمدولاتور در شکل (۵) نشان داده شده‌اند. هر نماد دریافتی نوفه‌ای به داخل یکی از نواحی تصمیم نگاشته می‌شود و به‌صورت یکی از نمادهای مجموعه {S0,S1, ... ,S7} آشکارسازی می‌شود. بنابراین دنباله‌ای از نمادهای یک مجموعه متناهی در خروجی دمدولاتور تولید می‌شود.



(شکل- ۳) : منظومه سیگنال و تغییرات فاز 8PSK در SNR=20dB

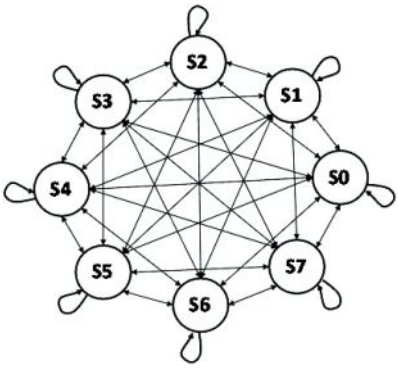


(شکل- ۴) : منظومه سیگنال و تغییرات فاز π/4DQPSK در SNR=20dB



(شکل- ۵) : مرزها و نواحی تصمیم دمدولاتور باندپایه 8PSK

خروجی دمدولاتور را می‌توان به‌صورت یک ماشین حالت متناهی با ۸ حالت ممکن متناظر با نمادهای آشکار شده، مشابه شکل (۶) در نظر گرفت. در این صورت، تغییر فاز نمونه‌های متوالی را می‌توان متناظر با تغییرحالت خروجی دمدولاتور در نظر گرفت. درواقع با استفاده از مرزهای تصمیم دمدولاتور 8PSK، نمونه‌های دریافتی و تغییر فاز بین آنها به مقادیر مشخص کوانتیزه شده‌اند. اگر سیگنال ورودی π/4DQPSK باشد، تنها تغییر حالت‌های متناظر با تغییرات فاز ۴۵± و ۱۳۵± وجود خواهند داشت. برای سیگنال‌های QPSK و OQPSK چهار حالت ممکن {S0, S2, S4, S6} متساوی‌الاحتمال خواهند بود، اگرچه در OQPSK تغییر حالت‌های متناظر با تغییر فاز ۱۸۰ درجه وجود نخواهد داشت.



(شکل- ۶) : دیاگرام حالت دمدولاتور 8PSK

۳-۱- ویژگی پیشنهادی QPSK و OQPSK

به‌منظور جداسازی مدولاسیون‌های QPSK و OQPSK، تعداد تغییر حالت‌های متناظر با تغییر فاز ۱۸۰ درجه را شمرده و از نسبت آن به تعداد تمام تغییر حالت‌ها، به‌عنوان ویژگی متمایزکننده استفاده می‌کنیم. این ویژگی را f180 نام‌گذاری کرده و به‌صورت زیر بیان می‌کنیم:

$$f180 = \frac{number\ of\ 180^{\circ}\ state\ transitions}{total\ state\ transitions} \qquad (۳)$$

برای تعداد مشاهدات زیاد می‌توان f180 را به‌عنوان تخمین احتمال تغییر حالت متناظر با تغییر فاز ۱۸۰ درجه در نظر گرفت. شکل (۷) مقدار ویژگی f180 را در SNRهای مختلف برای هر دو سیگنال QPSK و OQPSK نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که f180 یک ویژگی مناسب برای جداسازی این مدولاسیون‌ها حتی در SNRهای پایین است.

۳-۲- ویژگی پیشنهادی π/4DQPSK و 8PSK

به‌منظور جداسازی مدولاسیون‌های π/4DQPSK و 8PSK، تعداد تغییر حالت‌های متناظر با تغییر فاز ۹۰ درجه را

شمرده و از نسبت آن به تعداد تمام تغییر حالت‌ها، به‌عنوان ویژگی متمایزکننده استفاده می‌کنیم. این ویژگی را f90 نام‌گذاری کرده و به‌صورت زیر بیان می‌کنیم:

$$f90 = \frac{number\ of\ 90^{\circ}\ state\ transitions}{total\ state\ transitions} \qquad (۴)$$

برای تعداد مشاهدات بسیار زیاد می‌توان f90 را به‌عنوان تخمین احتمال تغییر حالت متناظر با تغییر فاز ۹۰ درجه در نظر گرفت. شکل (۸) مقدار ویژگی f90 را در SNRهای مختلف برای هر دو سیگنال π/4DQPSK و 8PSK نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که ویژگی f90 یک ویژگی مناسب برای جداسازی این مدولاسیون‌ها در SNR>5dB است.

۳-۳- طبقه‌بندی‌کننده بیزی

برای مرحله شناسایی الگو از یک طبقه‌بندی‌کنندهٔ بیزی استفاده شده است که در اینجا معرفی می‌شود. روش‌های زیادی برای نمایش طبقه‌بندی‌کننده‌های الگو وجود دارد. یکی از پرکاربردترین این روش‌ها استفاده از توابع جداساز[1] به‌صورت $g_i(X);\ i = 1,2,\dots,c$ است که در آن X بردار ویژگی و c تعداد طبقه‌ها است. طبقه‌بندی‌کنندهٔ بردار ویژگی X را به کلاس ω_i تخصیص می‌دهد، اگر:

$$g_i(X) > g_j(X) \quad for\ all\ j \neq i. \qquad (۵)$$

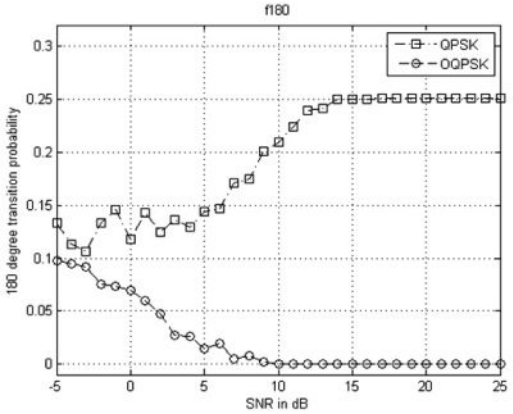
بنابراین می‌توان طبقه‌بندی‌کننده را شبکه یا ماشینی در نظر گرفت که توابع جداساز را محاسبه کرده و طبقهٔ متناظر با بزرگترین تابع جداساز را انتخاب می‌کند. برای داشتن نرخ خطای کمینه می‌توان تابع جداساز $g_i(X) = P(\omega_i|X)$ را درنظرگرفت که در این صورت تابع جداساز با بیشترین مقدار، متناظر با بزرگترین احتمال پسین خواهد بود.

یک طبقه‌بندی‌کنندهٔ بیزی از فرمول بیز برای تعویض احتمال پسین با احتمال پیشین استفاده می‌کند. با فرض توزیع احتمال گاوسی برای ویژگی‌ها می‌توان نشان داد که تابع جداساز برای یک طبقه‌بندی‌کننده بیزی با طبقه‌های متساوی‌الاحتمال به‌صورت زیر بیان می‌شود:

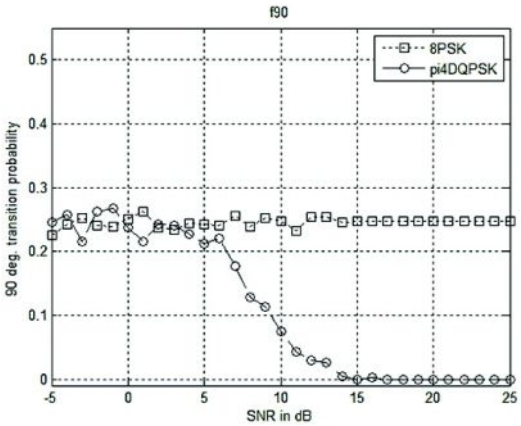
$$g_i(X) = -(X - m_i)^t C_i^{-1}(X - m_i) - ln|C_i| \qquad (۶)$$

که در آن m_i و C_i به‌ترتیب بردار متوسط و ماتریس کوواریانس متناظر با کلاس ω_i هستند که از روی نمونه‌های آموزشی به‌دست آمده‌اند (دودا، ۲۰۰۰).

[1] Discriminative Functions



(شکل- ۷) : مقدار ویژگی f180 در SNRهای مختلف



(شکل- ۸) : مقدار ویژگی f90 در SNRهای مختلف

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت عملکرد روش پیشنهادی با شبیه‌سازی‌های متعدد ارزیابی می‌شود. احتمال طبقه‌بندی صحیح[2] به‌عنوان معیار عملکرد طبقه‌بندی‌کننده در نظر گرفته شده است. بدین منظور عملیات تشخیص نوع مدولاسیون برای داده‌ها و نوفه تصادفی، دوهزار بار تکرار شده و نسبت تعداد تشخیص‌های صحیح به کل تکرارها، به‌عنوان احتمال طبقه‌بندی صحیح در نظر گرفته شده است. با فرض تعداد نمادهای مشاهده شده و شرایط SNR یکسان، نتایج به‌دست آمده با روش‌های پیشین مقایسه شده‌اند.

۴-۱- نتایج طبقه‌بندی QPSK و OQPSK

به‌منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی مبتنی بر ویژگی ابداعی f180 برای طبقه‌بندی مدولاسیون‌های QPSK و OQPSK احتمال طبقه‌بندی صحیح مدولاسیون تحت

[2] Probability of Correct Classification (PCC)

شرایط SNR مختلف، به‌دست آمده و با روش‌های پیشین مقایسه شده است.

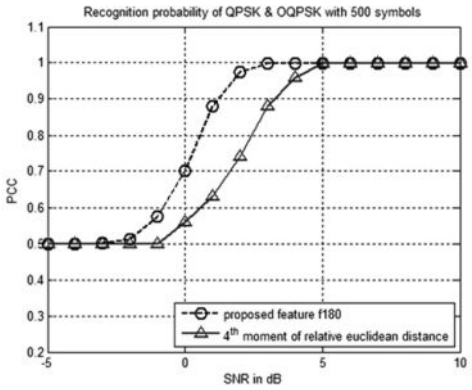
تا جایی که نگارندهٔ این مقاله اطلاع دارد، طبقه‌بندی QPSK و OQPSK پیش از این تنها در مقاله (وسترام نایک، ۲۰۰۶) بررسی شده است، که در آن از همان مرتبه چهارم فاصله اقلیدسی نسبی بین نمادهای دریافتی متوالی به‌عنوان ویژگی متمایز کننده استفاده شده است. این روش برای طبقه‌بندی مدولاسیون نیازمند آگاهی از SNR سیگنال دریافتی است و از روی پانصد نماد دریافتی برای SNR بزرگ‌تر از ۵ دسیبل به دقت ۱۰۰٪ دست می‌یابد. در شکل ۹ نمودارهای احتمال طبقه‌بندی صحیح مدولاسیون‌های QPSK و OQPSK، با استفاده از ویژگی پیشنهادی f180 و روش ارائه شده توسط (وسترام نایک، ۲۰۰۶) برای ۵۰۰ نماد دریافتی مقایسه شده‌اند.

واضح است که روش پیشنهادی این مقاله نسبت به روش ارائه‌شده در (وسترام نایک، ۲۰۰۶) از مزایایی مانند توانایی تشخیص صحیح در SNRهای پایین‌تر و عدم نیاز به آگاهی از مقدار SNR سیگنال دریافتی برخوردار است.

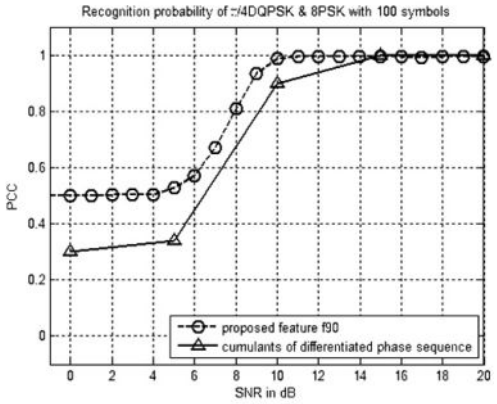
۴-۲- نتایج طبقه‌بندی π/4DQPSK و 8PSK

عملکرد روش پیشنهادی مبتنی بر ویژگی ابداعی f90 برای طبقه‌بندی مدولاسیون‌های π/4DQPSK و 8PSK تحت شرایط SNR مختلف ارزیابی شده است. به‌منظور مقایسهٔ این روش با روش‌های پیشین، طبقه‌بندی مدولاسیون با تعداد ۱۰۰ و ۲۰۰ نماد دریافتی شبیه‌سازی شده است. روش ارائه‌شده در (شن لی، ۲۰۰۶) کامولنت‌های دنباله تفاضلی فاز نمادهای دریافتی را به‌عنوان ویژگی متمایز کننده مدولاسیون‌های π/4DQPSK و 8PSK استخراج می‌کند. شکل‌های (۱۰و ۱۱) احتمال طبقه‌بندی صحیح را با استفاده از روش پیشنهادی این مقاله و روش ارائه شده توسط (شن لی، ۲۰۰۶) را به‌ترتیب برای ۱۰۰ و ۲۰۰ نماد مشاهده شده نشان می‌دهند.

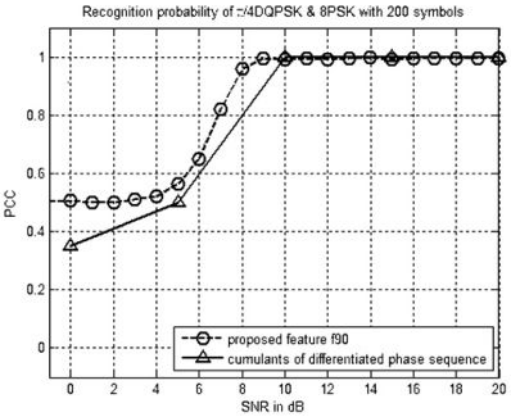
از نمودارهای احتمال طبقه‌بندی صحیح نشان‌داده‌شده در شکل‌های (۱۰ و ۱۱) مشاهده می‌شود که روش پیشنهادشده در این مقاله که مبتنی بر ویژگی ابداعی f90 است؛ به‌ویژه در SNRهای پایین عملکرد بهتری ارائه می‌دهد.



(شکل- ۹) : احتمال طبقه‌بندی صحیح QPSK و OQPSK پس از مشاهده ۵۰۰ سمبل دریافتی



(شکل- ۱۰) : احتمال طبقه‌بندی صحیح π/4DQPSK و 8PSK پس از مشاهده ۱۰۰ سمبل دریافتی



(شکل- ۱۱) : احتمال طبقه‌بندی صحیح π/4DQPSK و 8PSK پس از مشاهده ۲۰۰ سمبل دریافتی

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش طبقه‌بندی مدولاسیون مبتنی بر ویژگی برای جداسازی QPSK از OQPSK و همچنین

جداسازی π/4DQPSK از 8PSK پیشنهاد و بررسی شد. روش پیشنهادی از تغییر حالت‌های یک خروجی دمدولاتور 8PSK به‌عنوان ویژگی و از یک طبقه‌بندی‌کننده بیزی برای شناسایی الگو استفاده می‌کند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که روش پیشنهادی، به‌ویژه در SNRهای پایین، باعث بهبود قابل توجه عملکرد نسبت به‌روش‌های پیشین می‌شود. درنظرگرفتن کانال محوشدگی چندمسیری، آفست فاز و فرکانس و استفاده از دیگر روش‌های شناسایی الگو به‌عنوان موضوعاتی برای ادامه این پژوهش پیشنهاد می‌شوند.

۶- مراجع

Dobre, O. A., Abdi, A., Bar-Ness, Y & ,.Su, W . .(۲۰۰۷)A survey of automatic modulation classification techniques: classical approaches and new trends .IET Communications.۱۵۶-۱۳۷ ,۱ ,

Dobre, O. A., Oner, M., Rajan, S & ,.Inkol, R . .(۲۰۱۲) Cycl-ostationarity-Based Robust Algorithms for QAM Signal Identification .IEEE Communications Letters.۱۵-۱۲ ,(۱)۱۶ ,

Duda, R. O., Hart, P. E & ,.Stork, D. G .(۲۰۰۰) . Pattern Classification۲ نسخه) nd .(Wiley.

Farhang, M., Dehghani, H & ,.Bahramgiri, H .(۲۰۱۱) . Multi-Receiver Modulation Classification for Satellite Communications signals .International Conference on Signal and Image Processing Applic-ations.

Flohberger, M., Gappmair, W & ,.Koudelka, O . .(۲۰۱۰)Modulation classifier for signals used in satellite communications .Advanced satellite multimedia systems.(۲۰۲-۱۹۸ .ص) ,

Fontes, A. I .(۲۰۱۵) .Performance evaluation of the correntropy coefficient in automatic modulation classification .Expert Systems with Applications , .۸-۱ ,(۱)۴۲

Ghaleh, A., Naser Sharif, B., Farhang, M & ,. Nabipour, M .(۲۰۱۲) .Automatic Modulation Classification Using Support Vector Machine Pairwise Coupling for Satellite Communications Signals . MASFOR.

Hameed, F., Dobre, O. A & ,.Popescu, D. C .(۲۰۰۹) . On the Likelihood-Based Approach to Modulation Classification .IEEE TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS.۵۸۹۲-۵۸۸۴ ,(۱۲)۸ ,

Hassan, K., Dayoub, I., Hamouda, W & ,.Berbineau, M .(۲۰۰۹) .Automatic modulation recognition using wavelet transform and neural network .Intelligent Transport systems telecommunications-۲۳۴ .ص) , .۲۳۸)

Ho, K. M., Vaz, C & ,.Daut, D .(۲۰۰۹) .A wavelet-based method for classification of binary digitally modulated signals .IEEE Sarnoff Symposium.

Lopatka, J & ,.Pedzisz, M .(۲۰۰۰) .Automatic modulation classification using statistical moments and a fuzzy classifier .Conference on Signal Proc-essing WCCC-ICSP.

Maral, G & ,.Bousquet, M .(۲۰۰۹) .Satellite Communications Systems۵ نسخه) th .(Wiley.

Proakis, J. G & ,.Salehi, M .(۲۰۰۸) .Digital Communications۵ نسخه) th .(McGraw-Hill.

Ramkumar, B .(۲۰۰۹) .Automatic modulation classification for cognitive radios using cyclic feature detection .IEEE Circuits and Systems Magazine,(۲)۹ , .۴۵-۲۷

Richhari, M .(۲۰۱۴) .Mobile Satellite Com-munications: Principles and Trends۲ نسخه) nd .(John Wiley &Sons.

Shen, L., Li, S., Song, C & ,.Chen, F .(۲۰۰۶) .Automatic Modulation Classification of MPSK signals Using High Order Cumulants .Conference on Signal Processing.

Swami, A & ,.Sadler, B. M .(۲۰۰۰) .Hierarchical digital modulation classification using cumulants . IEEE Transactions on Communications.۴۲۹-۴۱۶ ,۴۸ ,

Teng, X., Tian, P & ,.Yu, H .(۲۰۰۸) .Modulation Classification Based on Spectral Correlation and SVM .Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing WiCOM.

Vastram Naik, M., Bhattacharjee, R., Mahanta, A & ,. Nemade, H .(۲۰۰۶) .Blind Adaptive Recognition of Different QPSK Modulated Signals for Software Defined Radio Applications .Conference on Communication System Software and Middleware Comsware.

Whitaker, J. C .(۲۰۱۴) .The RF Transmission Systems Handbook .CRC Press.

Zhu, Z. M .(۲۰۱۴) .Genetic algorithm optimized distribution sampling test for M-QAM modulation classification . Signal Processing.۲۷۷-۲۶۴ ,۹۴ ,

محسن فرهنگ مدرک کارشناسی خود را در رشتهٔ مهندسی رباتیک از دانشگاه صنعتی شاهرود در سال ۱۳۸۶ و مدرک کارشناسی خود را در رشتهٔ مهندسی مخابرات از دانشگاه صنعتی مالک اشتر در سال ۱۳۹۱ اخذ و هم‌اکنون به‌عنوان دانشجوی دکترای رشتهٔ مخابرات در دانشگاه صنعتی مالک اشتر مشغول به تحصیل است. پژوهش‌های ایشان به‌طور عمده بر روی حوزه‌های مخابرات سیار، رادیو نرم‌افزاری و تشخیص پارامترهای سیگنال متمرکز است.

نشانی رایانامهٔ ایشان عبارت است از:

farhang@mut.ac.ir

حسین بهرامگیری مدارک کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را در رشتهٔ مهندسی برق به‌ترتیب در گرایش‌های الکترونیک و مخابرات در دانشگاه صنعتی شریف در سال‌های ۷۹ و ۸۱ اخذ کرد. ایشان در سال ۸۸ دکترای خود را در رشتهٔ مهندسی برق گرایش مخابرات در دانشگاه تهران به اتمام رساند. ایشان در حال حاضر در دانشگاه صنعتی مالک اشتر در دانشکده‌های ICT و برق مشغول پژوهش است. زمینه مورد علاقهٔ ایشان کدینگ، تئوری اطلاعات، شبکه‌های مخابراتی و امنیت است.

نشانی رایانامهٔ ایشان عبارت است از:

bahramgiri@mut.ac.ir

حمید دهقانی مدرک کارشناسی خود را در رشتهٔ الکترونیک در سال ۱۳۷۹ از دانشگاه صنعتی مالک اشتر دریافت کرد. ایشان سپس دوره‌های کارشناسی ارشد و دکترای مخابرات را به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۸۱ و ۱۳۸۵ در دانشگاه تربیت مدرس به اتمام رساند. ایشان در حال حاضر استادیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر بوده و در زمینه‌های پردازش سیگنال و تصویر، شناسایی الگو و سنجش از دور تحقیقات خود را پیش می‌برد.

نشانی رایانامهٔ ایشان عبارت است از:

hamid_deh@yahoo.com