

## تشخیص مدولاسیون درون پالسی با استفاده از اطلاعات زمان-فرکانسی

### مبتنی بر توزیع بهبودیافته B

محمد ثابتیان<sup>۱\*</sup>، حمید دهقانی<sup>۲</sup>، حسین رعنائی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکترای جنگ الکترونیک، دانشگاه جامع امام حسین(ع)

۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۳- کارشناسی ارشد مخابرات، دانشگاه تبریز

(دریافت: ۹۶/۱۲/۱۷، پذیرش: ۹۷/۰۷/۲۱)

### چکیده

در محیط جنگ الکترونیک، رادارها می‌توانند دارای مدولاسیون‌های درون پالسی و بین پالسی متفاوتی باشند که باعث تمایز بین آنها می‌شود. تشخیص مدولاسیون درون پالسی در شرایطی که SNR منفی است موضوع مورد علاقه پژوهشگران است. در این مقاله با استفاده از روش فرکانسی و زمان-فرکانس به تفکیک مدولاسیون‌های درون پالسی می‌پردازیم. در این روش به تفکیک مدولاسیون‌های 4FSK، LFM، 2FSK و BPSK و NM می‌پردازیم. الگوریتم این روش بر مبنای ویژگی است و قادر به طبقه‌بندی تمام سیگنال‌های راداری از این نوع مدولاسیون‌هاست. برای تشخیص مدولاسیون از ویژگی‌های زمان-فرکانسی مبتنی بر تبدیل زمان-فرکانس بهبودیافته B استفاده شده است. نوآوری این مقاله نسبت به مقالات دیگر در استفاده از ویژگی‌های جدید از توزیع زمان فرکانس است. در این الگوریتم بعد از استفاده از توزیع زمان فرکانس، بعد آن کاهش داده شده است. و در هر فرکانس بیشترین مقدار زمانی در نظر گرفته شده و ویژگی‌های مدنظر از روی سیگنال استخراج شده است. الگوریتم ارائه شده قابلیت تفکیک صددرصدی سیگنال‌های راداری را برای این تعداد مدولاسیون درون پالسی تا نسبت سیگنال به نویز ۱۱ dB را دارد. دوحالتی که روش‌های مشابه دقت کمتری در رنج ۵ dB- تا ۵ dB دارد.

کلیدواژه‌ها: مدولاسیون درون پالسی، توزیع بهبودیافته B، Probability of successful recognition

### ۱- مقدمه

در محیط جنگ الکترونیک رادارها از ویژگی‌هایی برخوردارند که برای تفکیک آن‌ها از یکدیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این ویژگی‌ها می‌توان به اسکن رادار، مدولاسیون درون پالسی و مدولاسیون بین پالسی اشاره کرد. تشخیص مدولاسیون درون پالسی اولین قدم در شناسایی سیگنال راداری است که پس از آن می‌توان دیگر پارامترهای سیگنال را استخراج کرد [۱] در مبحث تشخیص مدولاسیون درون پالسی بیشترین تمرکز روی الگوریتم‌های مبتنی بر ویژگی است [۵-۲]. یکی از مهم‌ترین ابزار استخراج ویژگی از سیگنال راداری تبدیل زمان-فرکانس است که ویژگی‌های سیگنال را در دو بعد بیان می‌کند [۱۵-۶]. در [۹] روشی مقاوم برای تشخیص مدولاسیون درون پالسی مبتنی بر توزیع ویگنرویل و انتقال یادگیری ارائه شده است که برای SNR بالای ۱۰ dB و برای مدولاسیون‌های NM، LFM، BPSK و

QPSK دقت ۹۰ درصد دارد. در این روش، ویژگی‌های سه‌بعدی توزیع زمان-فرکانس ویگنرویل برای تشخیص مدولاسیون درون پالسی راداری استفاده شده است. ویژگی‌ها با استفاده از انتقال یادگیری بازسازی شده تا در SNRهای مختلف عملکرد مناسبی داشته باشد. در [۱۰] روشی مبتنی بر STFT بیان شد که تفکیک بین NM، PSK و LFM در باند باریک، دقت خوبی برای نسبت سیگنال به نویز ۱۰ dB دارد. در [۱۱] تشخیص مدولاسیون درون پالسی مبتنی بر تابع ابهام انجام گرفت که دقت آن برای پهنای باندهای متفاوت LFM و طول پالس‌های متفاوت برای SNR، ۱۱dB- و بالاتر دقت خوبی دارد. در این مقاله مدولاسیون‌های NM، LFM و BPSK از هم تفکیک شده‌اند. روش‌های بیان شده دارای دو اشکال بزرگ هستند. اول این که در SNRهای منفی دقت پایینی دارند و دوم این که محدودیت‌هایی روی پهنای باند، فرکانس حامل و عرض پالس سیگنال دارند. در [۱۲] از تبدیل زمان فرکانس ST-RFT و ممان‌های زرنیک برای استخراج ویژگی استفاده شده است که محدودیت‌های مقالات بالا را ندارد ولی دقت الگوریتم برای نسبت سیگنال به نویز بیشتر از

۱۱dB - دقت صددرصدی دارد. ویژگی دیگر این الگوریتم عدم وابستگی به فرکانس حامل، فاصله پرش‌های فرکانسی، و عرض پالس می‌باشد. مدل سامانه یک سامانه تشخیص مدولاسیون درون پالسی مبتنی بر توزیع زمان فرکانس بهبودیافته B در شکل (۱) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱) مشخص است، از توزیع بهبودیافته B برای استخراج ویژگی استفاده شده است. در ادامه با استفاده از ویژگی‌های زمان-فرکانس به دست آمده به تفکیک مدولاسیون‌های درون-پالسی از هم تفکیک شده‌اند.

## ۲- مواد و روش‌های تحلیل سیگنال

### ۲-۱- تحلیل فرکانسی

فرض می‌شود که نسخه زمانی سیگنال با طول  $N$  و نرخ نمونه‌برداری  $f_s$  با  $x[j]$  نمایش داده شود. محتوای فرکانسی سیگنال  $X[j]$  در یک بازه زمانی مشخص را می‌توان با استفاده از تبدیل فوریه گسسته در زمان به صورت تابعی از فرکانس و با استفاده از ضرایب تبدیل فوریه  $X[k]$  بیان کرد. تبدیل پارامترها بین حوزه زمان و فرکانس با استفاده از قضیه پارسوال آغاز می‌شود. قضیه پارسوال بیان می‌کند که حاصل جمع مجذور یک تابع با حاصل جمع مجذور تبدیل یافته آن برابر است:

$$\sum_{j=1}^{N-1} |x[j]|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |X[k]|^2 = \sum_{k=0}^{N-1} P[k] \quad (1)$$

که در آن،  $P[k]$  طیف توان بدون فاز و  $K$  اندیس فرکانس است. به‌طور معمول محتوای فرکانسی حاصل از تبدیل فوریه نسبت به فرکانس صفر متقارن است، در نتیجه در هنگام استفاده از طیف توان می‌توان کل آن یا بخشی از آن را مدنظر قرار داد [۱۷].

### ۲-۲- تحلیل زمان-فرکانس

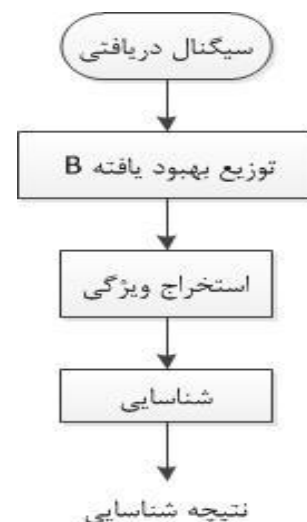
یکی از روش‌های تحلیل سیگنال راداری استفاده از تبدیل‌های زمان-فرکانس است که به سه دسته مهم تقسیم‌بندی می‌شوند:

- روش‌های زمان-فرکانس غیر پارامتری شامل تبدیل فوریه زمان کوتاه [۱۹-۱۸] و ویولت [۲۱-۲۰].
- روش‌های زمان-فرکانس درجه دوم غیر پارامتری شامل توزیع ویگنرویل [۲۰ و ۲۲].
- روش‌های تغییر زمان-زمان [۲۳-۲۴] پارامتری بر اساس مدل‌های AR با ضرایب متغیر.

در این تحقیق، روش توزیع بهبودیافته B، که یک روش زمان-فرکانس درجه دوم غیر پارامتری می‌باشد، برای تحلیل پالس راداری انتخاب شده است. این روش تفکیک‌پذیری زمان-فرکانس بهتری نسبت به روش‌های غیر پارامتریک ارائه

۵db - حدود ۹۵ درصد است که تقریباً برای پنج مدولاسیون 4FSK، 2FSK، BPSK، LFM، NM، کامل‌ترین الگوریتمی است که ارائه شده است. بدین منظور الگوریتمی طراحی شده است که برای سیگنال شبیه‌سازی شده تا نسبت سیگنال به نویز ۱۱dB - دقت تشخیص ۱۰۰ درصدی دارد.

توزیع ویگنرویل در تحلیل زمان فرکانس سیگنال اهمیت و کاربرد فراوانی دارد. در [۱۶]، از توزیع ویگنرویل برای استخراج فرکانس آنی سیگنال در SNR پایین استفاده شده است. توزیع زمان فرکانس بهبودیافته B نمونه بهبودیافته توزیع B و توزیع ویگنرویل است که در آن از کرنلی استفاده شده است که مستقل از تغییرات پنجره زمانی و تأخیر آن عمل می‌کند [۱۶]. توزیع‌های زمان فرکانس متداول به خاطر کرنلشان دارای جملاتی‌اند که طیف سیگنال اصلی را به خوبی نشان نمی‌دهد و در مواقعی که نویز در سامانه وجود دارد اهمیت آن مشخص می‌شود. توزیع بهبودیافته B رزولوشن زمان فرکانس بالایی دارد که برای سیگنالی که SNR آن منفی است نمایش بهتری دارد. در این مقاله روش جدیدی ارائه شده است که شامل "توزیع زمان فرکانس بهبودیافته B"، "پیدا کردن بیشینه مقدار فرکانسی در هر زمان و یافتن فراوانی این مقادیر فرکانسی"، و "استخراج ویژگی" برای تشخیص مدولاسیون‌های MP، LFM، BPSK، 2FSK و 4FSK در SNRهای منفی می‌باشد. بخش اول مقاله مربوط به محاسبه توزیع زمان فرکانس است که از روی آن می‌توانیم به استخراج ویژگی بپردازیم.



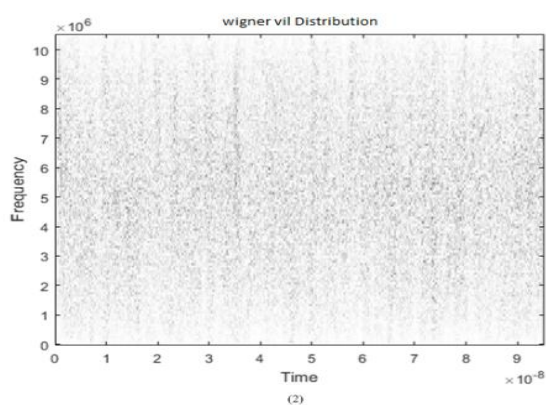
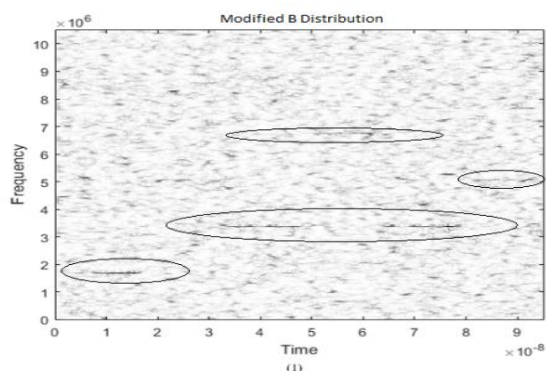
شکل (۱): مدل سامانه پیشنهادی در مقاله

در بخش دوم به توضیح تبدیل فرکانسی می‌پردازیم که برای تفکیک MP از BPSK از آن استفاده می‌کنیم. در بخش پایانی به بررسی دقت الگوریتم می‌پردازیم که برای سیگنال‌های بالای

را حذف می‌کند و تفکیک‌پذیری بالایی نیز دارد توزیع بهبودیافته B است که از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۹].

$$MBD_z(t, f) = \iint_{-\infty}^{+\infty} \frac{\cosh^{-2\beta}(t-u)}{\int_{-\infty}^{+\infty} \cosh^{-2\beta} \zeta d\zeta} \cdot z\left(u + \frac{\tau}{2}\right) \cdot z^*\left(u - \frac{\tau}{2}\right) \cdot e^{-j2\pi f\tau} du d\tau \quad (5)$$

که پارامتر  $\beta$  ( $0 < \beta \leq 1$ )، وضوح و محدودیت کراس ترم‌ها را کنترل می‌کند [۳۰-۲۹]. در شکل (۲) مقایسه‌ای از دو توزیع ویگنرویل و بهبودیافته B برای یک سیگنال 4FSK در SNR، ۱۳ dB نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۲) مشخص است توزیع بهبودیافته B نمایش قابل قبول تری نسبت به توزیع ویگنرویل دارد.



شکل (۲): توزیع بهبودیافته B (۱) و توزیع ویگنرویل (۲).

### ۳- روش پیشنهادی

در روش پیشنهادی، برای تحلیل زمان-فرکانس پالس راداری از توزیع زمان فرکانس بهبودیافته B استفاده شده است. در ادامه با استفاده از روش استخراج IF که در [۲۵] توضیح داده شده است، فعال‌ترین فرکانس را در زمان استخراج می‌کنیم.

می‌دهد و دارای کنترل‌های مستقلی برای زمان و فرکانس است و همچنین، هنگام وقوع تغییرات سریع، تخمین توان با واریانس کمتری نسبت به روش‌های پارامتریک ارائه می‌شود [۲۳].

### ۲-۲-۱- توزیع بهبودیافته B

انتخاب توزیع زمان-فرکانس مناسب که تفکیک‌پذیری بهتری داشته باشد از اهمیت حیاتی برخوردار است. باید توزیع مناسبی انتخاب شود که جملات ضربدری که حاصل نمایش زمان-فرکانس را خراب می‌کند در آن نباشد. بهترین توزیع زمان-فرکانس شناخته شده که در تحلیل سیگنال LFM مورد استفاده قرار می‌گرفت توزیع ویگنرویل است که برای سیگنال  $z$  از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۵].

$$W_z(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} z\left(t + \frac{\tau}{2}\right) \cdot z^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \cdot e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (2)$$

مهم‌ترین ایراد توزیع ویگنرویل، حضور تداخل و نبود رزولوشن فرکانسی بالا است [۲۵]. برای کاهش جملات ضربدری در توزیع ویگنرویل، تابع همبستگی آنی سیگنال را قبل از اعمال تبدیل فوریه توسط یک پنجره با تأخیر  $\tau$  محدود می‌کنیم

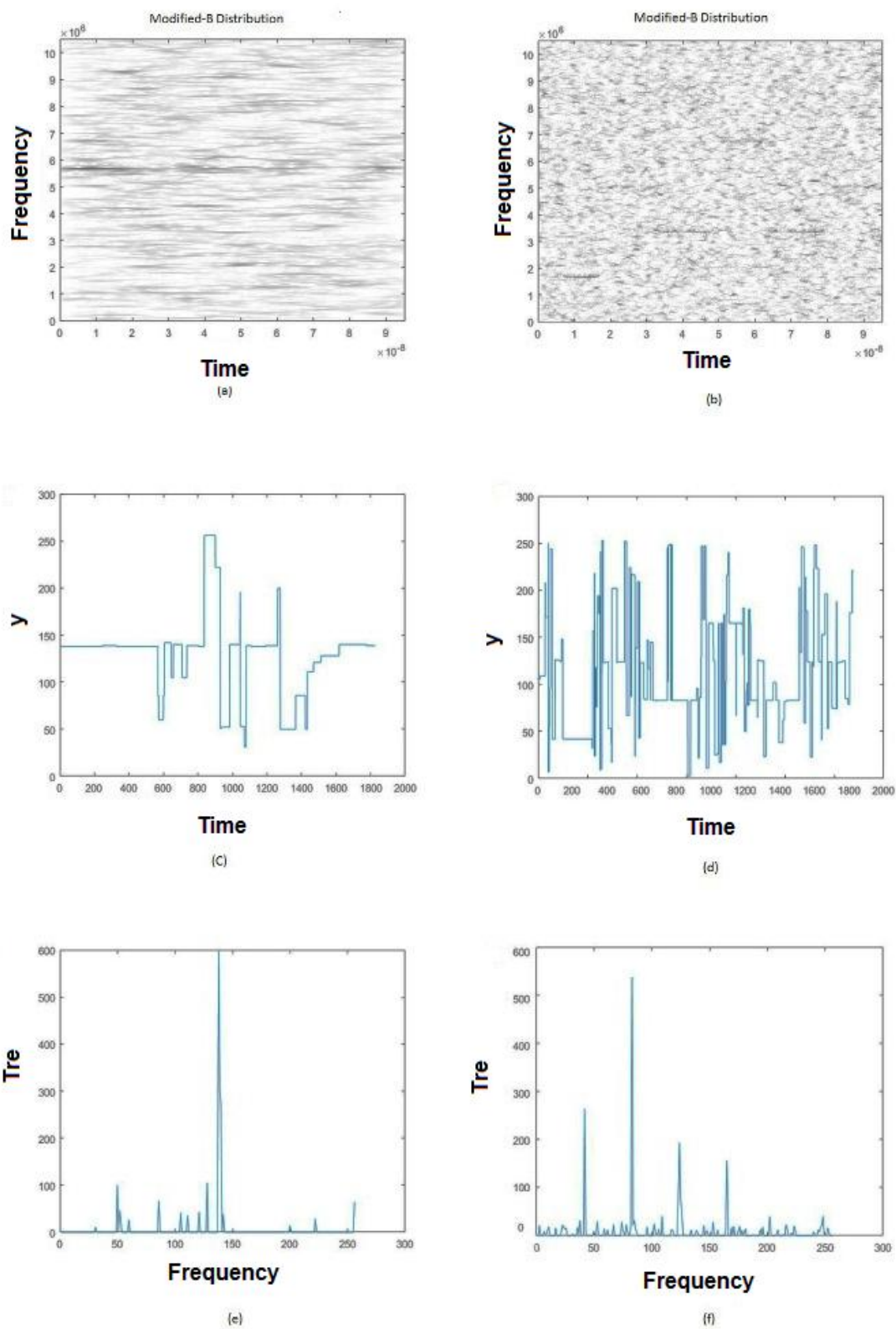
$$PW_z(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) \cdot z\left(t + \frac{\tau}{2}\right) \cdot z^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \cdot e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (3)$$

که توزیع فوق به توزیع مستقل از اثر داپلر نیز معروف است [۲۵]. کوچک کردن پنجره زمانی باعث ایجاد رزولوشن زمانی بهتر و وضوح فرکانسی پایین‌تر می‌شود [۲۵]. همچنان کوچک کردن پنجره فرکانسی باعث ایجاد رزولوشن فرکانسی بهتر و رزولوشن زمانی پایین‌تر می‌شود. برای مستقل بودن پنجره‌های زمانی و فرکانسی، توزیع زیر معرفی شد که به توزیع ساختگی نرم ویگنرویل معروف است [۲۵].

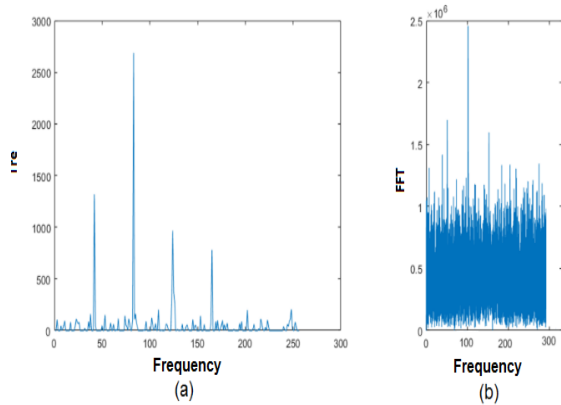
$$SPW_z(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) \int_{-\infty}^{+\infty} g(s-t) \cdot z\left(s + \frac{\tau}{2}\right) \cdot z^*\left(s - \frac{\tau}{2}\right) ds \cdot e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (4)$$

که در آن،  $g(t)$  پنجره زمانی است.

یکی از عواملی که باعث دقت بالای این الگوریتم شده انتخاب توزیع زمان-فرکانس مناسب است. در این روش از تبدیل زمان-فرکانسی استفاده شده است که در آن تداخل کاهش یافته و تفکیک‌پذیری بالایی داشته باشد. تبدیل‌های متفاوتی هستند که دارای این ویژگی می‌باشند که تعدادی از آن‌ها در [۲۶-۲۸] بررسی شده‌اند. یکی از توزیع‌هایی که تداخل



شکل (۳): توزیع زمان فرکانس سیگنال (a) BPSK و (b) 4FSK، سیگنال  $y$  برای بارکر (c) و (d) 4FSK، سیگنال Tre برای بارکر (e) و (f) 4FSK.



شکل (۴): Tre سیگنال 4FSK (a) و FFT سیگنال 4FSK (b) در SNR پایین

این شکل با استفاده از تبدیل FFT از روی سیگنال BPSK و Nomod در SNR پایین به دست آمده که به خوبی بیانگر تفاوت این دو سیگنال است. در مرحله بعدی برای تفکیک 4FSK باید چهار پیک اول نسبت به پیک پنجم بسیار بزرگتر باشد. در رابطه (۸)، ویژگی پیک‌های سیگنال 4FSK که موجب تفکیک آن از دیگر سیگنال‌ها می‌شود آورده شده است.

$$p4 > .25 * p1, \quad p5 < .5 * p4 \quad (8)$$

این رابطه بیانگر این است که چهار پیک اول باید نسبت به پیک پنجم بسیار بزرگتر باشند، در حالی که پیک چهارم نسبت به پیک اول بسیار کوچک نباشد و از یک چهارم آن بزرگتر باشد. چون در سیگنال 2FSK دو فرکانس نسبت به دیگر فرکانس‌ها فعال‌ترند، برای تفکیک آن باید به بررسی سه پیک ابتدایی بپردازیم. دو پیک اول باید از پیک سوم بزرگتر باشند و پیک دوم و سوم باید رابطه (۹) را ارضا کنند

$$p3 < .2 * p2 \quad (9)$$

در غیر این حالت سیگنال مدنظر LFM است که مهم‌ترین مشخصه این سیگنال فعال بودن نسبی اکثر فرکانس‌ها در نمودار Tre آن است. از طرفی پیک‌های این نمودار نسبت به چهار مدولاسیون دیگر مقدار خیلی کمی دارند و شروط مربوط به آن‌ها را ارضا نمی‌کنند. در شکل (۶) نمونه‌ای از سیگنال Tre استخراج شده از یک پالس LFM به طول ۱۴۲۶ نمونه نشان داده شده است. اندازه پیک اول ۱۹۲ است که نسبت به طول سیگنال مقدار خیلی کمی دارد. در ادامه پیک‌های دوم تا پنجم مقادیر بسیار نزدیک به هم دارند (۱۴۵، ۱۱۷، ۱۱۱ و ۱۰۲). در شکل (۷) شمای کامل الگوریتم تشخیص مدولاسیون نشان داده شده است.

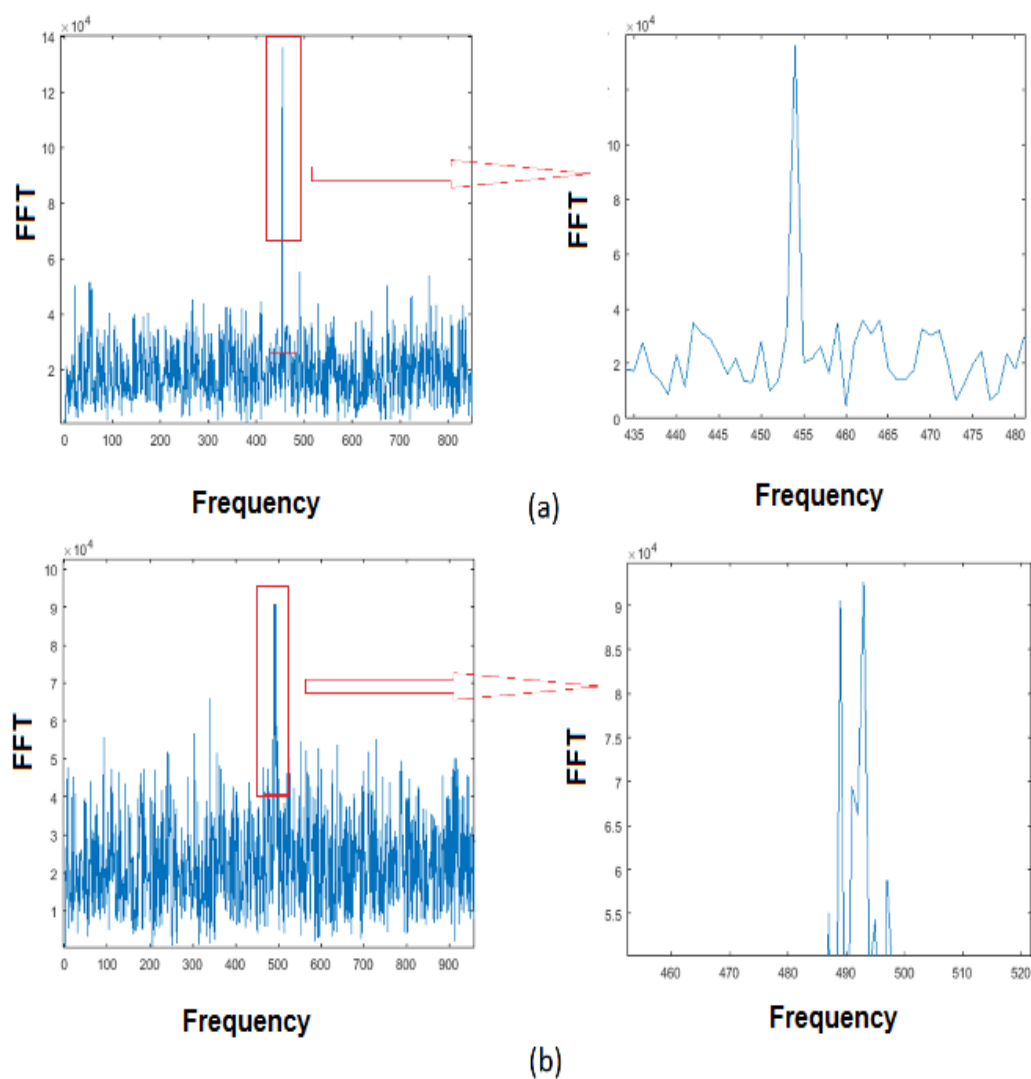
$$y = \arg \left[ \max_f TFD_c(t, f) \right] \quad (6)$$

در روش [۲۵]، در هر زمان بیشترین مقدار فرکانسی را یک نظر گرفته و بقیه مقادیر فرکانسی در هر زمان را صفر در نظر می‌گیریم. بدین ترتیب تبدیل زمان-فرکانس که یک ماتریس است به یک بردار دوبعدی تبدیل شده و محاسبات را نیز آسان‌تر می‌کند. در شکل (۳) دو نمونه از سیگنال BPSK و 4FSK که دارای SNR، ۱۳ dB- هستند نشان داده شده‌اند که در این شکل سیگنال y از این دو سیگنال استخراج شده است. در ادامه فراوانی فرکانس‌های فعال را از سیگنال y استخراج می‌کنیم که به سیگنال Tre می‌رسیم (شکل c-۳). برای بررسی تفاوت FFT و Tre باید به این نکته اشاره کرد که FFT را می‌توان با استفاده از مجموع طیفی توزیع زمان-فرکانس تخمین زد اما Tre از مجموع سیگنالی به دست آمده است که در هر زمان ماکزیمم مقدار فرکانسی آن یک است و دیگر مقادیر فرکانسی صفر است. بدین ترتیب می‌توان گفت در SNR بالا تقریباً FFT و Tre شباهت بالایی دارند ولی در SNR پایین FFT نمی‌تواند کاربردی داشته باشد.

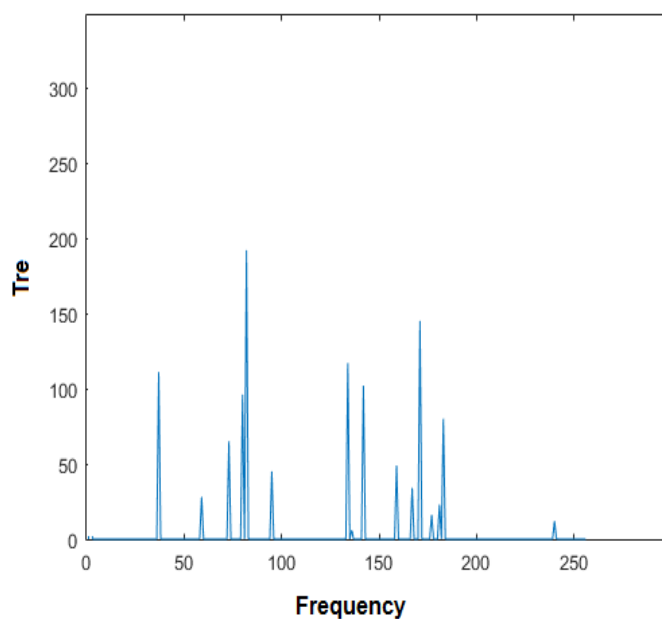
در شکل (۴) مقایسه بین Tre و FFT برای سیگنال 4FSK و SNR پایین نشان داده شده است. چون در SNR پایین تفکیک فرکانسی بسیار سخت است، ممکن است دو یا چند فرکانس فعال در کنار یکدیگر به اشتباه به جای یک فرکانس نمایش داده شوند. برای حل این مشکل، فرکانس‌های فعال بسیار نزدیک به هم را حذف کرده و تنها یک فرکانس را که بیشترین مقدار را دارد در نظر می‌گیریم. بدین ترتیب با مرتب کردن صعودی سیگنال به دست آمده به راحتی پیک‌های سیگنال را به دست می‌آوریم. ما در این مقاله به بررسی پنج پیک ابتدایی سیگنال Tre برای تفکیک مدولاسیون‌ها می‌پردازیم. ویژگی‌های استفاده شده برای تفکیک مدولاسیون‌ها، به صورت تجربی از بین ۴۰۰۰ سیگنال آزمایشگاهی در هر نمونه پالس BPSK، Nomod، LFM، 4FSK و 2FSK به دست آمده است. در بررسی این سیگنال‌ها به این نتیجه رسیده‌ایم که دو ویژگی مشترک بین سیگنال بارکر و Nomod وجود دارد که در رابطه (۷) می‌بینیم.

$$p1 > .3 * \text{length}(y), \quad p1 > 5 * p2 \quad (7)$$

اما این دو ویژگی بین BPSK و Nomod مشترک است و برای تفکیک این دو از شکستگی فاز استفاده می‌کنیم که این شکستگی فاز در FFT سیگنال در شکل (۵) مشخص است.



شکل (۵): مقایسه پیک و شکست فاز در تبدیل FFT بین سیگنال بارکر و Nomod



شکل (۶): سیگنال Tre استخراج شده از یک پالس LFM

کدهای بارکر خاصیت غیر تناوبی و غیر تکراری آن است که به واسطه آن یک فیلتر تطبیقی دیجیتال قادر است به راحتی محل کد بارکر را در یک دنباله بیتی آشکار کند [۳۱]. برای 2FSK و 4FSK از کدهای قطعی استفاده شده است که کاستی‌ها و نواقص مربوط به دیگر کدها را ندارد. کد مربوط به 2FSK [۰۱۱۰۱۰] و کد مربوط به 4FSK [۲۱۳۱۲۰] می‌باشد. در مجموع SNR نیز از ۱۱- تا ۱۳- متغیر است.

#### ۴-۲- انتخاب پارامترهای سیگنال برای آزمون

##### الگوریتم

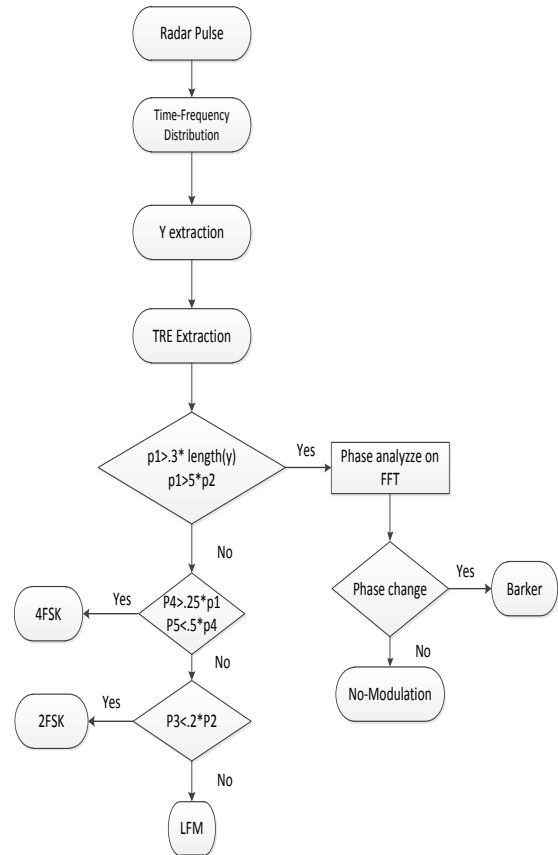
برای مقایسه عملکرد الگوریتم مورد نظر با الگوریتم مبتنی بر STFT و اثبات بهبودی الگوریتم پیشنهادی، شبیه‌سازی‌های زیر انجام شده است. در هر دو الگوریتم فرکانس‌های حامل، ۸۰۰MHz، ۱۰۰۰MHz، و ۱۶۰۰MHz در نظر گرفته شده است. پرش فرکانسی ۶۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است. شیب سیگنال LFM نیز  $۴۰\text{MHz}/\mu\text{s}$ ،  $۸۰\text{MHz}/\mu\text{s}$ ، و  $۱۰۰\text{MHz}/\mu\text{s}$  در نظر گرفته شده است.

#### ۴-۳- تحلیل نتایج شبیه‌سازی

برای تخمین دقت الگوریتم، بر روی ۵۰۰۰ سیگنال راداری تست انجام گرفت.

#### ۴-۳-۱- تأثیر فرکانس حامل و پرش فرکانسی و شیب LFM بر روی الگوریتم

سیگنال‌های Nomod و BPSK در رنج فرکانس‌های حامل ۸۰۰ تا ۱۶۰۰ مگاهرتز و سیگنال‌های 2FSK و 4FSK در رنج پرش فرکانسی ۱۰ تا ۱۰۰ مگاهرتز و سیگنال‌های LFM با رنج شیب ۱۰ تا ۴۰ مگاهرتز بر میکروثانیه شبیه‌سازی شده‌اند. تغییر فرکانس حامل باعث جابجایی محل پیک‌ها روی نمودار Tre می‌شود و تأثیری روی مقدار پیک‌ها و دقت الگوریتم ندارد. زمانی که پرش فرکانسی کمتر از ۱۳ مگاهرتز باشد، به علت شباهت طیف به سیگنال تک تون و افزایش مقدار پیک اول، ممکن است تشخیص الگوریتم به سمت Nomod یا 2FSK میل کند (شکل (۸-ا)). همان‌طور که در شکل (۹-ا) مشخص است، پایین بودن پرش فرکانسی باعث نزدیک شدن پیک‌های سیگنال به هم می‌شود و در SNRهای پایین باعث کاهش دقت الگوریتم می‌شود. زمانی که شیب سیگنال LFM کمتر از ۱۵ مگاهرتز بر میکروثانیه باشد، چون شیب کم سیگنال باعث بالا رفتن یکی از مؤلفه‌های فرکانسی می‌شود، دقت الگوریتم پایین می‌آید (شکل (۹-ب)). البته این در حالی است که الگوریتم‌های مشابه این مؤلفه را برای شیب ۴۰ الی ۱۲۰۰ مگاهرتز بر میکروثانیه بررسی کرده‌اند که در آن محدوده دقت الگوریتم صد درصد است [۱۳].



شکل (۷): الگوریتم تشخیص مدولاسیون درون پالسی مبتنی بر ویژگی‌های زمان-فرکانس

#### ۴-۲- بحث و بررسی

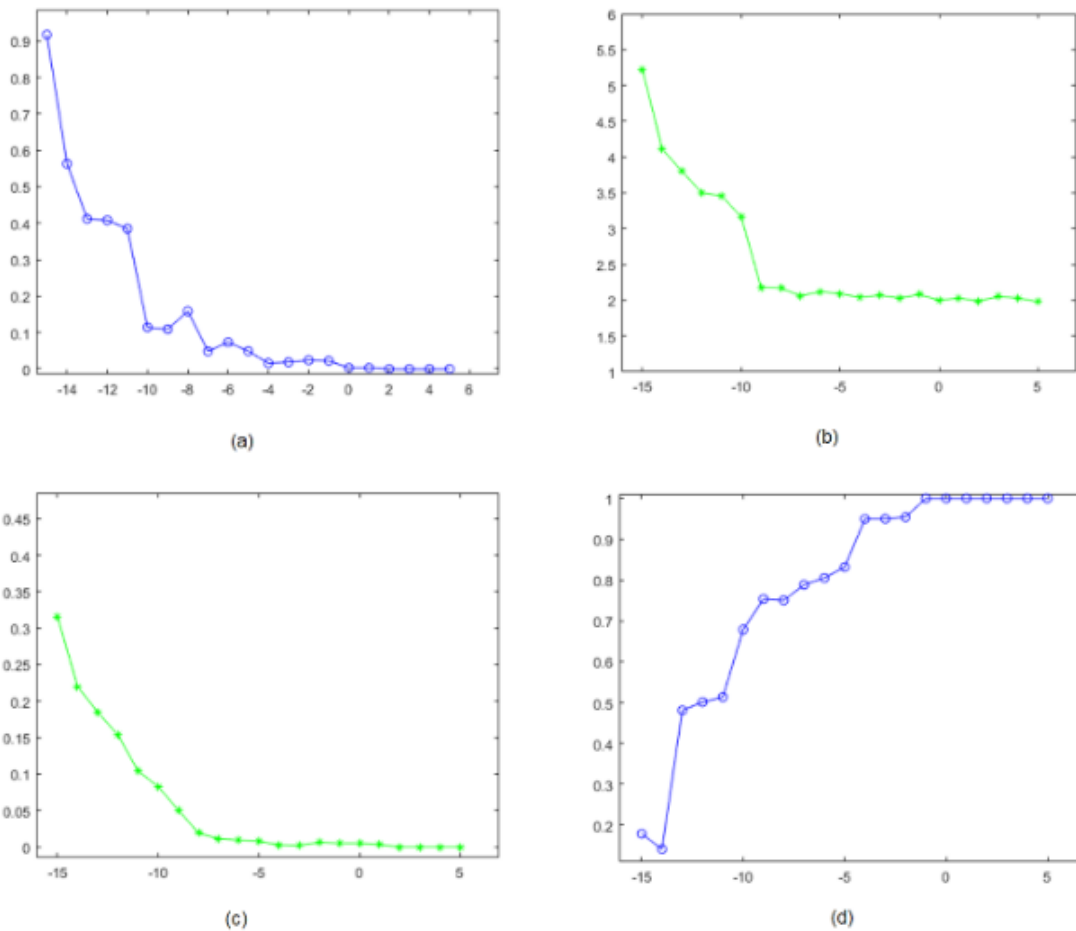
##### ۴-۱- انتخاب پارامترهای سیگنال برای دسته‌بندی

پارامترهای استفاده شده برای سیگنال‌های آزمایشگاهی در جدول (۱) نشان داده شده‌اند. HS و PW به ترتیب، عرض پالس و پرش فرکانسی می‌باشند. همچنین CR، نرخ کد  $۱۰\text{MHz}/\mu\text{s}$  برای سیگنال BPSK، 2FSK و 4FSK در نظر گرفته شده است. ضمناً برای BPSK از بارکر ۱۳ استفاده کردیم.

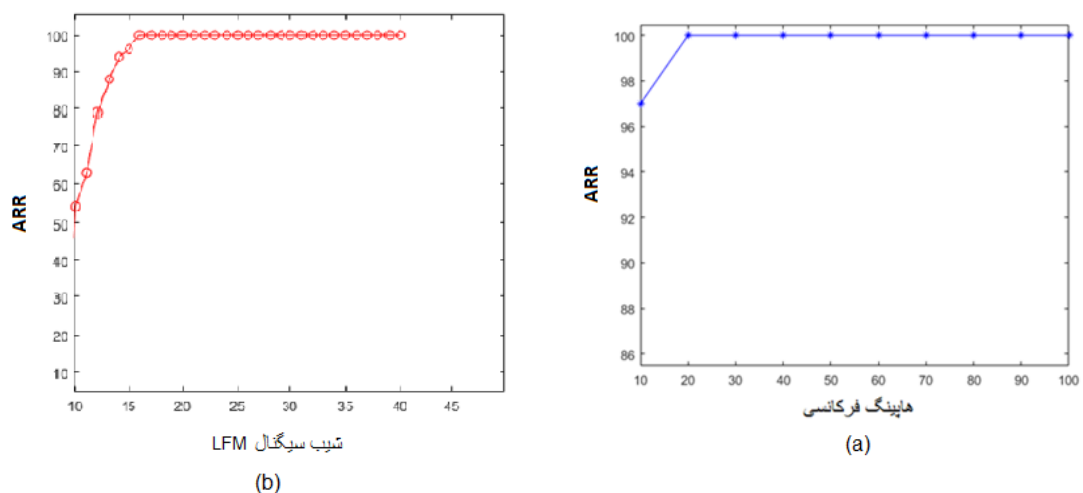
جدول (۱): پارامترهای تشخیص سیگنال

نوع سیگنال	CF	CR	PW	HS
Nomod	800MHz		1μs	
BPSK	800MHz	10MHz/μs	1μs	
2FSK	800MHz	10MHz/μs	1μs	16MHz
4FSK	800MHz	10MHz/μs	1μs	16MHz

کد بارکر رشته محدودی از مقادیر مختلط است که اندازه مقادیر آن برابر ۱ می‌باشد و از دو نوع دودویی و تریبویی تشکیل شده است که حالت تریبویی آن دارای مقادیر مختلط و حالات دودویی آن دارای مقادیر ۱ و -۱ است. مهم‌ترین ویژگی



شکل (۸): (a): نسبت p5 به p4 برای تشخیص 4FSK (b): نسبت p1 به p4 برای تشخیص 4FSK (c): نسبت p3 به p2 برای تشخیص 4FSK (d): نسبت p1 به طول سیگنال y برای تشخیص BPSK و nomod



شکل (۹): (a) تحلیل عملکرد الگوریتم برای پرش‌های فرکانسی متفاوت در سیگنال FSK، (b) تحلیل عملکرد الگوریتم برای شیب‌های متفاوت در سیگنال LFM برای SNR=-11dB

بین ۱۰۰ سیگنال میانگین‌گیری کرده‌ایم. همان‌طور که در شکل نیز پیداست برای تشخیص بارکر و Nomod از دیگر سیگنال‌ها تا SNR -13 دسی‌بل نسبت p1 به طول سیگنال بیشتر از ۰/۳ است (شکل d-۸)). همچنین در پرش فرکانسی پایین، پیک‌های اول

### ۴-۳-۲- عملکرد الگوریتم پیشنهادی

در شکل (۸) به استخراج ویژگی‌های بررسی شده از ۱۰۰ سیگنال در نسبت سیگنال به نویز -15db تا 5db پرداخته‌ایم. برای این کار از هر سیگنال در هر SNR صد نمونه ساخته‌ایم و برای هر ویژگی



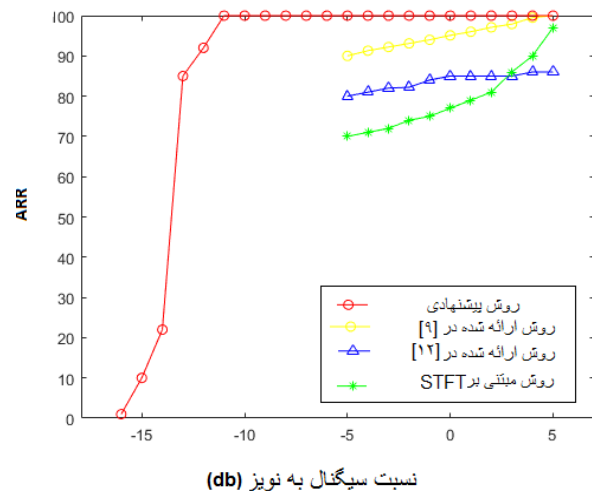
می‌باشند. بدیهی است که تغییر این کد برای سیگنال‌های FSK می‌تواند در پارامترهای استخراج‌شده تغییر حاصل کرده و روند نتیجه‌گیری را با مشکلاتی روبرو کند و دقت الگوریتم را پایین بیاورد. همچنین فعالیت و فراوانی فرکانس‌ها بین دو مدولاسیون FSK می‌تواند بر روند نتیجه‌گیری مؤثر باشد.

همچنین با افزودن تعداد تست‌ها می‌توان دقت این الگوریتم را مورد بررسی قرارداد. در این مقاله از بارکر نوع ۱۳ استفاده شده است که طول سیگنال بارکر، نوع آن و فاصله بین شکست فرکانسی در این سیگنال موضوعی است که در این مقاله به بررسی آن نپرداخته‌ایم و می‌تواند به‌عنوان کار آینده مورد بررسی قرار بگیرد.

## ۶- منابع

- [1] W. Pei, QZ. Yang, Z. Jun, and T Bin, "Autonomous radar pulse modulation classification using modulation components analysis," EURASIP J. Adv. Signal Process, pp. 1-11, 2016.
- [2] OA. Dobre, A. Abdi, Y. Bar-Ness, and W. Su, "Survey of automatic modulation classification techniques: classical approaches and new trends," IET Com 1(2), pp. 137-156, 2007.
- [3] D. Grimaldi, S. Rapuano, and LD. Vito, "An Automatic Digital Modulation Classifier for Measurement on Telecommunication Networks," IEEE Trans Instrum Meas vol. 56(5), pp. 1171-1720, 2007.
- [4] SZ. Hsue and SS. Soliman, "Automatic modulation classification using zero crossing," IEEE Proc, Radar, Sonar Navig, vol. 137(6), pp. 459-464, 1990.
- [5] H. Alharbi, S. Mobien, S. Alshebeili, and F. Alturki, "Automatic modulation classification of digital modulations in presence of HF noise," EURASIP J Adv Signal Process, vol. 33, pp. 3639-3654, 2012.
- [6] K. Hassan, I. Dayoub, W. Hamouda, and M. Berbineau, "Automatic Modulation Recognition Using Wavelet Transform and Neural Networks in Wireless Systems," EURASIP J Adv Signal Process, vol. 1, pp. 1-13, 2010.
- [7] S. Qian and D. Chen, "Joint Time-Frequency Analysis," IEEE Sig Process Mag, vol. 1, pp. 57-62, 1999.
- [8] F. Hlawatsch and GF. Boudreaux-Bartels, "Linear and quadratic time-frequency signal representations," IEEE Sig Process Mag, vol. 2, pp. 325-332, 1992.
- [9] Z. Yang, W. Qiu, and H. Sun, "A Nallanathan, Robust Radar Emitter Recognition Based on the Three-Dimensional Distribution Feature and Transfer Learning Sensors," vol. 1, pp. 1-14, 2016.
- [10] G. Lopez-Risueno, J. Grajal, and A. Sanz-Osorio, "Digital Channelized Receiver Based on Time-Frequency Analysis for Signal Interception," IEEE Trans Aerosp Electron System, vol. 3, pp. 879-898, 2005.

و دوم به هم نزدیک شده و تشخیص FSK از Nomod مشکل خواهد شد و دقت الگوریتم پایین می‌آید (شکل (۹-a)). نسبت  $p_5$  به  $p_4$  کمتر از  $0/5$  و نسبت  $p_1$  به  $p_4$  کمتر از  $4$  می‌باشد (شکل (۸-a,b)). همچنین نسبت  $p_3$  به  $p_2$  برای تشخیص 2FSK به‌طور میانگین برای SNR کمتر از  $13$  دسی‌بل کمتر از  $0/2$  می‌باشد (شکل (۸-c)). با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌ها، روش پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به روش ارائه‌شده در [۱۲]، روش مبتنی بر STFT و روش ارائه‌شده در [۹] دارد (شکل (۱۰)).



شکل (۱۰): دقت الگوریتم پیشنهادی برای SNRهای متفاوت در مقایسه با دیگر الگوریتم‌ها

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش جدیدی برای تشخیص مدولاسیون درون پالسی در شرایط SNR پایین ارائه شد. در این روش در ابتدا از توزیع بهبودیافته B برای پنج مدولاسیون درون پالسی محاسبه شده است. در ادامه ماکزیمم مقدار فرکانسی در هر زمان از طیف زمان-فرکانس به‌دست آمد و ویژگی‌هایی از روی سیگنال استخراج کردیم که از روی آن بتوانیم مستقل از شرایط متغیر سیگنال به تفکیک مدولاسیون درون پالسی بپردازیم. نتایج شبیه‌سازی‌ها بیانگر یک عملکرد مقاوم الگوریتم در رنج متفاوت SNR، فرکانس حامل، پرش فرکانسی و طول زمانی سیگنال می‌باشد.

هرچند این مقاله تنها بر روی پنج مدولاسیون بررسی شده است و می‌توان برای ادامه کار این روش را برای مدولاسیون‌های دیگری از جمله nLFM، PWM و PPM نیز بررسی کرد و دقت آن را به چالش کشید. از طرفی مقاله ارائه‌شده برای سیگنال‌هایی از جنس FSK بررسی شده است که دارای کدینگ [۲۱۳۱۲۰]

- representations,” *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 43, no. 1, pp. 46-59, 1996.
- [22] S. B. Jasson, “Instant power spectrum analysis of heart rate variability during orthostatic tilt using a time-/frequency-domain method,” *Circulation*, vol. 96, no. 10, pp. 3521-3526, 1991.
- [23] A. Bianchi, L. Mainardi, C. Meloni, S. Chierchia, and S. Cerutti, “Continuous monitoring of the sympatho-vagal balance through spectral analysis. Recursive autoregressive techniques for tracking transient events in heart rate signals,” *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.*, vol. 16, no. 5, pp. 64-73, 1997.
- [24] O. Meste, B. Khaddoumi, G. Blain, and S. Bermon, “Time-varying analysis methods and models for the respiratory and cardiac system coupling in graded exercise,” *IEEE Trans. Biomed. Eng.* vol. 52, no. 11, pp. 1921-1930, 2005.
- [25] B. Boashash, ed., “Time Frequency Signal Analysis and Processing,” *A comprehensive Reference*, Elsevier, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford, UK, 2003.
- [26] H. I. Choi and W. J. Williams, “Improved time-frequency representation of multicomponent signals using exponential kernels,” *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 37, no. 6, pp. 862-871, 1989.
- [27] M. G. Amin and W. J. Williams, “High spectral resolution time-frequency distribution kernels,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 46, no. 10, pp. 2796-2804, 1998.
- [28] L. Stankovic, “On the realization of the polynomial wignerville distribution for multicomponent signals,” *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 5, no. 7, pp. 157-159, 1998.
- [29] Z. M. Hussain and B. Boashash, “Adaptive instantaneous frequency estimation of multicomponent FM signals using quadratic time-frequency distributions,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 50, no. 8, pp. 1866-1876, 2002.
- [30] L. Rankine, M. Mesbah, and B. Boashash, “IF estimation for multicomponent signals using image processing techniques in the time-frequency domain,” *Signal Processing*, vol. 87, no. 6, pp. 1234-1250, 2007.
- [31] Z. Zarei, M. M. Madani, and R. Mohseni, “Detection of Phase Code Modulated LPI Radar Signals using Time-Frequency Distributions and Comparing with Power Function of Matched Detector,” *Journal of Radar*, vol. 2, no. 4, 2015 (in persian).
- [11] Y. Zhang, X. Ma, and D. Cao, “Automatic Modulation Recognition Based on Morphological Operations,” *Circuits System Signal Process* vol. 5, pp. 2517-2515, 2013.
- [12] X. Ma, Dan. Liu, and Y. Shan, “Intra-pulse modulation recognition using short-time ramanujan fourier transform spectrogram,” *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 3, 2017.
- [13] D. Zeng, X. Zeng, H. Cheng, and B. Tang, “Automatic modulation classification of radar signals using the Rihaczek distribution and Hough transform,” *IET Radar Sonar Navig* vol. 5, pp 322-331, 2012.
- [14] T.J. Lynn and A.Z. Shamer, “Automatic analysis and classification of digital modulation signals using spectrogram time frequency analysis,” *Proc. International Symposium on Communications & Information Technologies*, Sydney, pp. 916-920, 2007.
- [15] F. Xie, C. Li, and G. Wan, “An Efficient and Simple Method of MPSK Modulation Classification,” *4th International Conf on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing ,WiCOM 08*, Dilian, China, pp. 1-3, 2008.
- [16] J. Lerga, V. Sucic, and B. Boashash, “An Efficient Algorithm for Instantaneous Frequency Estimation of Nonstationary Multicomponent Signals in Low SNR,” *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 5, 16 pages, 2011.
- [17] A. H. Davaie Markazi and M. Nazarahari, “Application of DWT for Ship’s Acoustic Signal Identification Using Feature Extraction Methods and Ensemble Learning,” *Modarres (In Persian)*.
- [18] K. Martinn aki, H. Rusko, S. Saalasti, and J. Kettunen, “Ability of short-time Fourier transform method to detect transient changes invagal effects on hearts: a pharmacological blocking study,” *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.*, vol. 290, no.6, pp. 2582-2589, 2006.
- [19] A. S. Keselbrener, “Selective discrete Fourier transform algorithm for time- frequency analysis: method and application on simulated and cardiovascular signals,” *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 43, no. 8, pp. 789-802, 1996.
- [20] P. N. V. Novak, “Time/frequency mapping of the heart rate, blood pressure and respiratory signals,” *Med. Biol. Eng. Comput*, vol. 31, no.2, pp. 103-110, 1993.
- [21] S. MAEM and M. C. Pola, “Estimation of the power spectral density in non-stationary cardiovascular time series: assessing the role of the time-frequency

---

## Intra-pulse Modulation Recognition Using Time-Frequency Features Based on Modified-B Distribution

M. Sabetian\*, H. Dehghani, H. Ranaei

\*Imam Hossein University

(Received: 08/03/2018, Accepted: 13/10/2018)

### ABSTRACT

*In the electronic warfare environment, radars can be differentiated according to intra-pulse and inter-pulse modulations. Detection of intra-pulse modulation with negative SNR is a topic of interest to researchers. In this paper separation of intra-pulse modulation with frequency and time-frequency methods is presented. Using this method, we can categorize different types of LFM, 4FSK, 2FSK, BPSK, and NM modulations. The algorithm of this method is based on characteristics and it is able to classify all radar signals from these types of modulations. To detect the modulation, time-frequency characteristics based on the improved time-frequency transform, B, have been used. The innovation in this research, is the use of new characteristics of time-frequency distribution. The proposed algorithm uses time-frequency distribution to analyze radar signals. Dimension reduction is performed next, then for each frequency the maximum time value is considered and the characteristics are extracted from signal. The presented algorithm has 100% capability of separating radar signals for this number of intra-pulse signals up to -11dB of SNR whereas similar methods have less accuracy with SNR range between -5db to 5db.*

**Keywords:** Intra-pulse modulation, Modified-B distribution, Probability of successful recognition.

---

\* Corresponding Author Email: [sabetian@gmail.com](mailto:sabetian@gmail.com)