

# تشخیص مدولاسیون فاصله تکرار پالس‌های راداری

معین احمدی<sup>1</sup>

کمال محامدپور<sup>2</sup>

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران - ایران

[moein@ee.kntu.ac.ir](mailto:moein@ee.kntu.ac.ir)

2- دانشیار، دانشکده مهندسی کامپیوتر - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران - ایران

[kmpour@kntu.ac.ir](mailto:kmpour@kntu.ac.ir)

**چکیده:** در یک محیط پرتراکم جنگ الکترونیک سیگنال‌های راداری زیادی وجود دارند. یک رادار می‌تواند دارای مدولاسیون‌ها و مقادیر فاصله تکرار پالس متنوعی باشد. شناسایی و تعیین این مدولاسیون‌ها و مقادیر تکرار پالس در سیستم پشتیبان جنگ الکترونیک بسیار مهم است. در این مقاله روشی برای تخمین مقدار سطوح فاصله تکرار پالس ارائه و بررسی شده است. همچنین، بسط ریاضی تابع خودهمبستگی بایاس شده انواع رشته فاصله تکرار پالس به دست آورده شده است و با استفاده از خواص تابع خودهمبستگی بایاس شده رشته فاصله تکرار پالس و خوشه‌بندی سلسله مراتبی آن، روشی جدید برای تشخیص مدولاسیون فاصله تکرار پالس و مقدار سطوح آن پیشنهاد شده است. با استفاده از شبیه‌سازی عملکرد روش ارائه شده بررسی و مورد ارزیابی قرار گرفته است.

**کلمات کلیدی:** تابع خودهمبستگی بایاس شده، زمان ورود پالس، سیستم پشتیبان جنگ الکترونیک، مدولاسیون فاصله تکرار پالس.

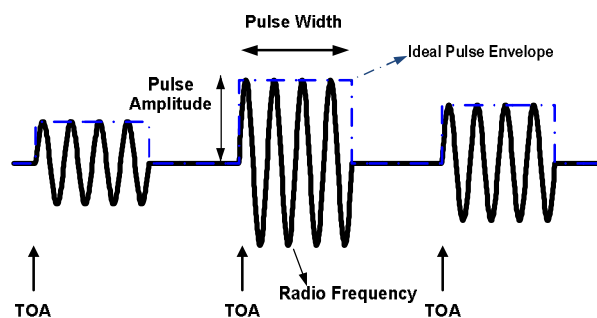
تاریخ ارسال مقاله : 1387/8/21

تاریخ پذیرش مقاله : 1388/7/6

نام نویسنده‌ی مسئول : معین احمدی

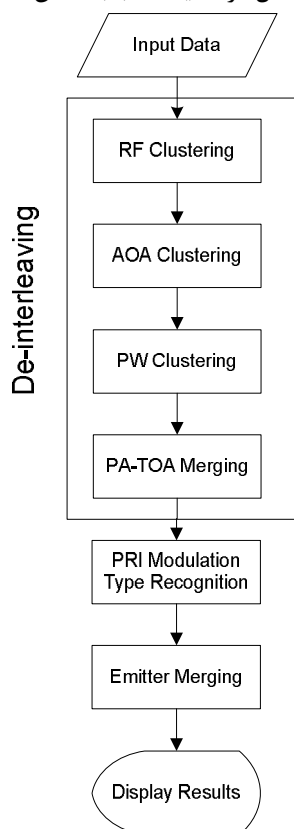
نشانی نویسنده‌ی مسئول : ایران - تهران - سید خندان - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - دانشکده‌ی برق

## 1- مقدمه



شکل (1): پارامترهای سیگنال رادار پالسی

حدود 10 درجه است، اما از آنجا که این پارامتر تنها به موقعیت فیزیکی رادار فرستنده بستگی دارد و اقدامات ضد جنگ الکترونیک تأثیری در مقادیر زاویه ورود پالس ندارند، در لایه‌های بالای جداسازی پالس‌ها از آن استفاده می‌شود [7]. مقادیر پهنای پالس اندازه‌گیری شده به علت پدیده چندمسیرگی و مشکل بودن اندازه‌گیری آن از دقت کمتری برخوردارند. دامنه پالس‌ها به صورت غیر خطی تغییر می‌کنند و معمولاً از مقادیر آن‌ها در جداسازی پالس‌های رادارهای مختلف استفاده نمی‌شود [9]. پارامتر زمان ورود پالس دقیق‌ترین پارامتر اندازه‌گیری شده پالس‌های راداری است و می‌توان از آن در جداسازی پالس‌های متداخل استفاده کرد. همچنین در تشخیص نوع مدولاسیون و مقادیر سطوح PRI از مقادیر زمان ورود پالس‌ها استفاده می‌شود. رادارهای فعال در محیط اغلب به اسکن محیط می‌پردازند.

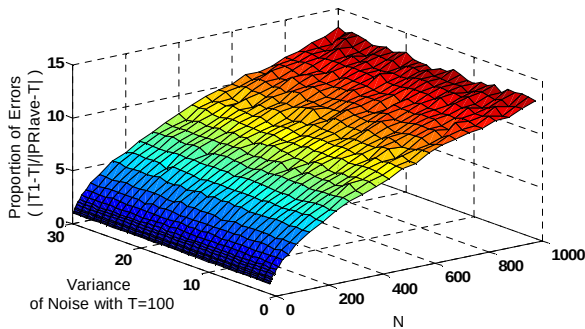


شکل (2): بلوک دیاگرام واحد پردازش اطلاعات یک سیستم پشتیبان جنگ الکترونیک با جداسازی پالس‌های رادارهای مختلف

در یک محیط پرتراکم جنگ الکترونیک رادارهای بسیاری فعالیت می‌کنند. یک رادار پالسی، سیگنال‌های پالسی شکل با پارامترهای مشخص ارسال می‌کند. پارامترهای اندازه‌گیری شده توسط یک سیستم پشتیبان جنگ الکترونیک از یک پالس از این رادارها شامل زمان ورود پالس (TOA)<sup>1</sup>، فرکانس رادیویی (RF)<sup>2</sup>، پهنای پالس (PW)<sup>3</sup>، دامنه پالس (PA)<sup>4</sup> و زاویه ورود پالس (AOA)<sup>5</sup> می‌باشد. با پیشرفت رادارهای پالسی، این رادارها از مدولاسیون‌های پیچیده‌تری برای فاصله تکرار پالس‌ها (PRI)<sup>6</sup> استفاده می‌کنند [1]. یک سیستم پشتیبان جنگ الکترونیک وظیفه شناسایی رادارهای فعال در محیط را دارد. تشخیص انواع مدولاسیون‌های فاصله تکرار پالس می‌تواند در تشخیص و شناسایی رادار منبع سیگنال دریافتی بسیار کارا باشد. در روش‌های معمول، مدولاسیون‌های فاصله تکرار پالس Constant و Staggered در فرآیند جداسازی پالس‌های رادارهای مختلف تشخیص داده می‌شوند [1]. سایر مدولاسیون‌های فاصله تکرار پالس Jittered، Sliding، Dwell and switch و Wobulated در صورت عدم تشخیص به عنوان نویز، تحت عنوان مدولاسیون‌های پیچیده اعلام می‌گردند [2 و 3]. در [4] فرض شده است مدولاسیون‌های فاصله تکرار پالس Constant و Staggered در فرآیند جداسازی پالس‌ها با روش هیستوگرام تفاضلی ترتیبی<sup>7</sup> و جستجوی رشته<sup>8</sup> [5 و 6] استخراج می‌شوند و سپس مدولاسیون‌های پیچیده با استفاده از ویژگی‌های تابع خودهمبستگی رشته PRI شناسایی می‌شود. در طرح ارائه شده در این مقاله جداسازی پالس‌های رادارهای مختلف توسط پارامترهای فرکانس، زاویه ورود پالس، پهنای پالس و همچنین دامنه پالس انجام می‌گیرد [7]. سپس زمان ورود پالس‌های هر دسته جهت تعیین مدولاسیون PRI و نیز مقادیر سطوح PRI استفاده می‌شود. در این مقاله ابتدا مدل و ویژگی‌های زمان ورود پالس‌ها و تخمین مقدار PRI متناظر با رشته TOA بیان می‌گردد. در بخش بعد تعریف ریاضی انواع مدولاسیون‌های PRI آورده می‌شود و بسط ریاضی تابع خودهمبستگی بایاس شده انواع مدولاسیون‌های PRI را به دست می‌آوریم. سپس روشی برای جداسازی سطوح PRI بر مبنای روش خوشه بندی سلسله مراتبی<sup>9</sup> ارائه می‌گردد. در بخش 3 طرح تشخیص مدولاسیون و سطوح PRI ارائه می‌شود. در بخش 4 عملکرد روند ارائه شده در یک سناریو شبیه‌سازی می‌گردد.

## 2- پارامترهای پالس‌های راداری

در شکل 1 سیگنال رادار پالسی نمایش داده شده است. پارامتر فرکانس رادیویی معمولاً با دقت بالایی اندازه‌گیری می‌شود [8] و در فرآیند جداسازی پالس‌های رادارهای مختلف (شکل 2) از اهمیت بالایی برخوردار است. دقت اندازه‌گیری زاویه ورود پالس‌ها نیز در



شکل (3): نسبت خطای تخمین حداقل مربع خطای فاصله تکرار پالس‌ها به خطای تخمین  $PRI_{ave}$  بر حسب تعداد پالس‌های دریافتی و واریانس نویز TOA.

$$p_n = t_n - t_{n-1} ; \quad n=1, 2, \dots, N \quad (6)$$

با جایگذاری  $t_n$  از رابطه (1) داریم:

$$p_n = (t_n^{ideal} - t_{n-1}^{ideal}) + s(z_n - z_{n-1}) = T_n + s z_n ; \quad n=1, 2, \dots, N \quad (7)$$

که  $T_n$  فاصله بین پالس  $n$ ام با پالس قبل در حالت ایده‌آل و  $n_n$  نمونه‌های نویز گوسی رنگی با میانگین صفر و واریانس 2 است. همانطور که گفته شد  $z_n$  نمونه‌های نویز سفید گوسی با متوسط صفر و واریانس واحد است و تابع خودهمبستگی بایاس شده آن به صورت یک تابع ضربه است.

$$z_n \sim N(0,1) , \quad C_z(k) = d(k) \quad (8)$$

تابع خودهمبستگی بایاس شده برای نمونه‌های  $x_n$   $n=1, 2, 3, \dots, N$  به صورت رابطه (9) تعریف می‌شود [4].

$$C_x(k) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-k} (x_n - m_x)(x_{n+k} - m_x) ; & k=0, 1, \dots, N-1 \\ C_x(-k) & ; k=-1, -2, \dots, 1-N \end{cases} \quad (9)$$

در رابطه فوق  $m_x = \sum_{n=1}^N x_n$  میانگین سیگنال  $x_n$  است.

تابع  $C_x(k)$  تابعی زوج است و بررسی آن به ازای  $k \geq 0$  کفایت می‌کند.

تابع خودهمبستگی بایاس شده نویز جمع شونده رشته PRI نیز به صورت زیر به دست می‌آید.

$$C_v(k) = 2d(k) - d(k+1) - d(k-1) \quad (10)$$

رشته PRI علاوه بر نویز رنگی گوسی جمع‌شونده  $n_n$  دارای دو نوع نویز غیر خطی ناشی از پالس‌های گم و اضافه شده نیز می‌باشد [4].

## 2-2- نویز ناشی از پالس‌های گم شده در رشته PRI

پایین بودن توان دریافتی در گیرنده سیستم تشخیص پارامترهای پالس و همچنین قرار گرفتن پالس‌های چند رادار در یک زمان، سبب عدم تشخیص پالس توسط الگوریتم تشخیص پالس می‌شوند. فرآیند جداسازی پالس‌ها نیز می‌تواند باعث گم شدن پالس‌ها شود [12].

این امر سبب ایجاد شکل موج سینک مانند در حوزه دامنه پالس-زمان ورود پالس می‌شود. در این مقاله از اطلاعات دامنه پالس تنها در ترکیب دسته پالس‌های خوشه بندی شده با پارامترهای فرکانس-زاویه ورود پالس-پهنای پالس استفاده می‌شود [7]. در ادامه به دلیل اهمیت پارامتر زمان ورود پالس‌ها به تشریح مدل و ویژگی‌های زمان ورود پالس‌ها و تخمین مقدار PRI متناظر با رشته TOA می‌پردازیم.

## 1-2- زمان ورود پالس‌ها TOA

یک گیرنده سیستم پشتیبان جنگ الکترونیک زمان ورود پالس‌ها را با اندازه‌گیری زمانی که دامنه پالس در لبه بالارونده از یک آستانه عبور می‌کند به دست می‌آورد. زمان ورود پالس‌ها برای یک رشته پالس  $N+1$  تایی دریافتی در گیرنده به صورت زیر بیان می‌گردد [10 و 11].

$$t_n = t_n^{ideal} + s z_n ; \quad n=0, 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

در رابطه (1)،  $z_n$  نمونه‌های نویز سفید گوسی با متوسط صفر و واریانس واحد و  $s^2$  واریانس نویز جمع شونده و  $t_n^{ideal}$  زمان ورود پالس‌ها در حالت ایده‌آل است. برای یک رشته پالس با فاصله ثابت به صورت زیر است.

$$t_n^{ideal} = nT + f ; \quad n=0, 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

که  $T$  فاصله زمانی ثابت بین پالس‌ها و  $f$  زمان بین اولین پالس دریافتی و اولین پالس ارسالی است. برای به دست آوردن مقدار فاصله تکرار پالس‌ها از تخمین حداقل مربع خطا استفاده می‌کنیم.

$$e^2 = \sum_{n=0}^N (t_n - t_n^{ideal})^2 = \sum_{n=0}^N (t_n - nT - f)^2 \quad (3)$$

برای به دست آوردن تخمین  $\hat{T}$  مشتق  $e^2$  نسبت به  $T$  و  $f$  را مساوی صفر قرار می‌دهیم.

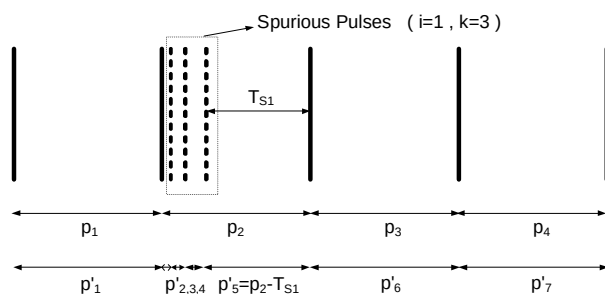
$$\begin{cases} \frac{\partial e^2}{\partial T} = 0 \Rightarrow \sum_{n=0}^N n(t_n - nT - f) = 0 \\ \frac{\partial e^2}{\partial f} = 0 \Rightarrow \sum_{n=0}^N (t_n - nT - f) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

با حل معادلات (4) تخمین  $\hat{T}$  را به صورت زیر به دست می‌آوریم.

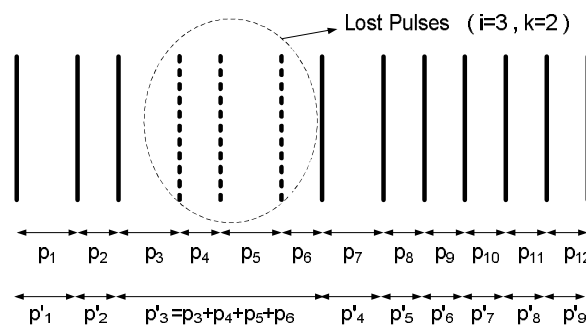
$$\hat{T} = \left[ \sum_{n=0}^N (n - \frac{N}{2}) t_n \right] \frac{12}{N(N+1)(N+2)} \quad (5)$$

در شکل 3 خطای تخمین حداقل مربع خطای فاصله تکرار پالس را با تخمین معمول میانگین فواصل تکرار پالس  $\hat{T}_{ave} = PRI_{ave} = (t_N - t_0) / N$  مقایسه کرده ایم. همانطور که ملاحظه می‌شود نسبت خطای تخمین حداقل مربع خطا به خطای تخمین  $\hat{T}_{ave}$  با افزایش تعداد پالس‌ها افزایش می‌یابد و تخمین حداقل مربع خطا تخمین بهتری خواهد بود. در بخش 2-5 از تخمین حداقل مربع خطا برای تخمین مقادیر سطوح PRI استفاده می‌کنیم.

رادارها برای مقاصد مختلف فواصل بین پالس‌های ارسالی خود را تغییر می‌دهند. رشته PRI به صورت رابطه (6) تعریف می‌شود.



شکل (5): تشکیل رشته PRI جدید با فرض گم شدن پالس‌ها



شکل (4): تشکیل رشته PRI جدید با فرض گم شدن پالس‌ها

اصلی بعدی است. رشته  $s_n^i$  به توزیع پالس‌های اضافه شده بستگی دارد. در این مقاله برای رشته  $s_n^i$  توزیع یکنواخت بین صفر و  $T_{Si}$  در نظر گرفته شده است. این فرآیند در شکل 5 نشان داده شده است. اگر در  $S$  پالس اصلی، پالس‌های اضافه شده داشته باشیم رشته PRI ایجاد شده به صورت رابطه (14) خواهد بود.

$$\begin{aligned} p_n^{\text{Spurious}} &= p_n^S ; \\ p_n^m &= g(p^{m-1}, i_{m-1}, k_{m-1}), \quad m=1, 2, \dots, S \end{aligned} \quad (14)$$

که رشته PRI ایجاد شده ناشی از افزوده شدن دسته  $m-1$  ام از پالس‌های اضافه است و  $p_n^0 = p_n$ . رادارهای پالسی برای انجام مقاصد مختلف از مدولاسیون‌های PRI متفاوتی استفاده می‌کنند. در شکل 6 انواع مدولاسیون‌های Dwell, Wobulated, Sliding, Staggered, Jittered, Constant and switch نشان داده شده است. هر یک از این مدولاسیون‌ها کاربرد خاصی دارند. برای تشخیص این مدولاسیون‌ها، ابتدا مدل ریاضی آن‌ها را بیان می‌کنیم.

## 2-4- مدل ریاضی رشته PRI انواع مدولاسیون‌های PRI

همانگونه که در شکل 6 مشاهده می‌شود مدولاسیون Constant ساده‌ترین نوع الگوی تکرار پالس است. در این مدولاسیون، پالس‌ها با فاصله  $T$  از یکدیگر تکرار می‌شوند. رشته زمان ورود پالس‌ها و رشته PRI برای مدولاسیون Constant به صورت زیر است [1].

$$\begin{cases} t_n^{\text{Cons}} = nT + f + s \quad z_n ; \quad n = 0, 1, 2, \dots, N \\ p_n^{\text{Cons}} = T + s \quad v_n ; \quad n = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (15)$$

که  $T$  فاصله تکرار پالس‌ها و  $n_n$  نمونه‌های نویز گوسی رنگی با میانگین صفر و واریانس 2 است. برای مدولاسیون Constant محدوده  $T$  در رادارها در حدود 10 میکروثانیه تا 5 میلی‌ثانیه است و انحراف معیار  $s$  معمولاً از یک درصد مقدار  $T$  کمتر است [1]. تابع خودهمبستگی بایاس شده رشته PRI را برای این مدولاسیون PRI از  $k \geq 0$  به صورت رابطه (16) به دست می‌آوریم.

$$C_p^{\text{Cons}}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-k} s^2 n_n n_{n+k} = s^2 (2d(k) - d(k-1)) \quad (16)$$

چنانچه در یک رشته PRI فرضی  $\{p | p_n ; n=1, 2, \dots, N\}$  یک دسته پالس از پالس  $i$  تا  $(i+k)$  ام ( $i=0, 1, 2, \dots, N-i$  و  $k=0, 1, 2, \dots, N-i$ ) گم شود رشته PRI جدید  $\{p' | p'_n ; n=1, 2, \dots, N-k-1\}$  تشکیل خواهد شد:

$$p'_n = f(p, i, k) = \begin{cases} p_n & ; n=1, 2, \dots, i-1 \\ \sum_{m=i}^{i+k+1} p_m ; n=i \\ p_{n+k+1} & ; n=i+1, \dots, N-k-1 \end{cases} \quad (11)$$

اگر پالسی گم نشده باشد  $p'_n = p_n$ . این فرآیند در شکل 4 نشان داده شده است.

در صورتی که  $L$  دسته پالس گم شده داشته باشیم رشته PRI نهایی به صورت رابطه (12) خواهد بود.

$$p_n^{\text{Lost}} = p_n^L ; p'_n = f(p^{l-1}, i_{l-1}, k_{l-1}), \quad l=1, 2, \dots, L \quad (12)$$

که رشته  $p^{l-1}$  PRI ایجاد شده ناشی از دسته  $l-1$  ام پالس‌های گم شده است و  $p_n^0 = p_n$ . همانطور که از رابطه (11) پیداست گم شدن پالس‌ها سبب ایجاد سطوح PRI برابر با ترکیب خطی سایر سطوح واقعی موجود در رشته PRI اصلی می‌شود. از این موضوع در تصحیح رشته PRI برای جبران اثر پالس‌های گم شده استفاده می‌شود.

## 2-3- نویز ناشی از پالس‌های اضافه شده در رشته PRI

پالس‌های اضافه شده در اثر پدیده چندمسیرگی ناشی از بازگشت‌های زمین و اتمسفر به وجود می‌آیند [8]. این پالس‌ها عموماً با فاصله‌ای نزدیک به یک پالس واقعی افزوده می‌شوند. اگر به پالس نام رشته  $\{p | p_n ; n=1, 2, \dots, N\}$  به تعداد  $k$  پالس افزوده شود رشته PRI جدید  $\{p' | p'_n ; n=1, 2, \dots, N+k\}$  تشکیل خواهد شد.

$$p'_n = g(p, i, k) = \begin{cases} p_n & ; n=1, 2, \dots, i \\ s_n^i & ; n=i+1, \dots, i+k \\ p_{n-k} - T_{Si} & ; n=i+k+1 \\ p_{n-k} & ; n=i+k+2, \dots, N+k \end{cases} \quad (13)$$

که  $T_{Si}$  فاصله آخرین پالس اضافه شده به یک پالس اصلی از پالس

در این مدولاسیون سطوح PRI از مقدار  $T_{Start}$  شروع و در  $M$  سطح هر بار به مقدار  $T_{Step}$  تغییر می‌کنند.  $C_p^{Slid}(k)$  را به صورت رابطه (23) به دست می‌آوریم.

$$C_p^{Slid}(k) = \frac{1}{N} [ \left( \frac{N-k-N'}{M} h_1(M) + h_1(N') \right) (k \bmod M)^2 + \left( \frac{N-k-N'}{M} h_2(M) + h_2(N') \right) (k \bmod M) + \left( \frac{N-k-N'}{M} h_3(M) + h_3(N') \right) ] + s^2 (2d(k) - d(k-1)) \quad (23)$$

که در آن

$$\begin{cases} N' = (N - k) \bmod M \\ T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{Step} ((n-1) \bmod M) \end{cases} \quad (24)$$

و

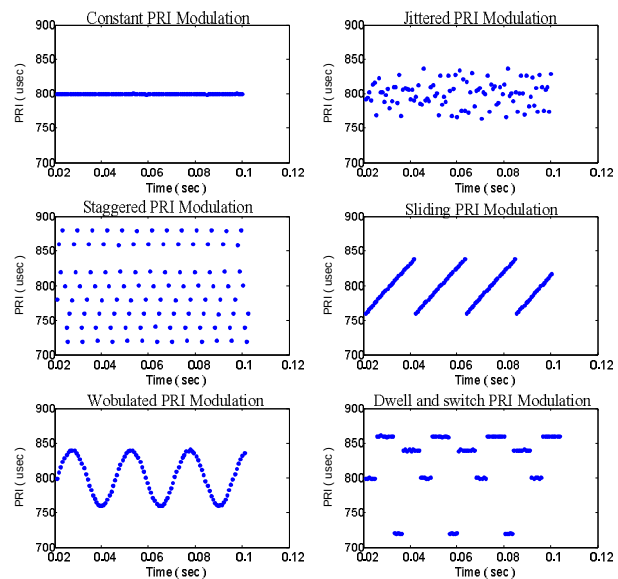
$$\begin{cases} h_1(x) = \frac{T_{Step}^2}{2} x \\ h_2(x) = T_{Step}^2 x \left(1 - \frac{x}{2}\right) - TT_{Step} \\ h_3(x) = \frac{T_{Step}^2}{3} x^3 - T_{Step} \left(T + \frac{T_{Step}}{2}\right) x^2 + \left(T^2 + \frac{T_{Step}^2}{6}\right) x + T^2 \end{cases} \quad (25)$$

نوع دیگر مدولاسیون PRI، مدولاسیون Wobulated است. تغییرات سینوسی در رشته PRI این مدولاسیون با دامنه تقریباً 5 درصد میانگین PRI و فرکانس در حدود 50 هرتز است [1]. رشته PRI مدولاسیون Wobulated به صورت رابطه (26) است.

$$p_n^{Wobul} = T + A \sin(\omega n + f) + s v_n ; n = 1, 2, \dots, N \quad (26)$$

که  $\omega$  فرکانس مدولاسیون و  $f$  فاز اولیه آن است. تابع خود همبستگی بایاس شده رشته PRI مدولاسیون Wobulated بدون نویز را نیز به صورت رابطه (27) به دست آورده ایم.

$$C_p^{Wobul}(k) = \frac{A^2}{2N} [ (N-k) \cos(\omega k) - \frac{\cos(\omega(N-k+1)) \sin(\omega(N-k+1))}{\sin(\omega)} - [\cos(\omega k + 2f) - \sin(\omega k + 2f) \tan(\omega(N-k+1))] - \frac{N-k}{N^3} A^2 \frac{\sin^2(\frac{\omega N}{2}) \cos^2(\frac{\omega(N+1)}{2})}{\sin^2(\frac{\omega}{2})} - (\sin f + \cos f \tan(\frac{\omega(N+1)}{2}))^2 - \frac{2A^2}{N^2} \frac{\sin(\frac{\omega N}{2}) \cos(\frac{\omega(N+1)}{2})}{\sin^2(\frac{\omega}{2})} \sin(\frac{\omega(N-k)}{2}) \sin(\frac{\omega(N-k+1)}{2}) \cos(\frac{\omega k}{2}) (\sin f + \cos f \tan(\frac{\omega(N+1)}{2})) (\sin(\frac{\omega k}{2} + f) + \cos(\frac{\omega k}{2} + f) \tan(\frac{\omega(N-k+1)}{2})) ] \quad (27)$$



شکل (6): انواع مدولاسیون های PRI

در مدولاسیون Jittered پالس‌ها در محدوده خاصی به صورت تصادفی قرار می‌گیرند.

$$p_n^{Jitt} = T + J v_n + s v_n ; n = 1, 2, \dots, N \quad (17)$$

که  $J$  مقدار جیتر ایجاد شده در رادار فرستنده برای مقابله با تداخل دشمن است و مقدار آن حداکثر تا 30 درصد مقدار  $T$  است [9].

تابع خودهمبستگی بایاس شده رشته PRI برای مدولاسیون Jittered به ازای  $k \geq 0$  را نیز بصورت رابطه زیر به دست می‌آوریم.

$$C_p^{Jitt}(k) = (J^2 + s^2)(2d(k) - d(k-1)) \quad (18)$$

مدولاسیون Staggered دارای  $M$  سطح PRI به صورت  $T_i ; i = 0, 1, \dots, M-1$  است. مقادیر معمول برای  $M$  بین 2 تا 8 سطح است [6]. رشته PRI و تابع خودهمبستگی بایاس شده آن برای این مدولاسیون به صورت زیر است.

$$p_n^{Stag} = T_{n \bmod M} + s v_n ; n = 1, 2, \dots, N \quad (19)$$

اپراتور mod بیانگر باقیمانده تقسیم  $n$  بر  $M$  است.

$$C_p^{Stag}(k) = \frac{N-k}{N} s^2 d(k \bmod M) + s^2 (2d(k) - d(k-1)) \quad (20)$$

که در آن

$$s^2 = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} (T_i - \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} T_j)^2 \quad (21)$$

در مدولاسیون Sliding سطوح به طور یکنواخت از یک سطح PRI به یک سطح دیگر تغییر می‌کنند.

$$p_n^{Slid} = T_{Start} + T_{Step} ((n-1) \bmod M) + s v_n ; n = 1, 2, \dots, N \quad (22)$$

ابتدا رشته فواصل  $D$  و رشته اندیس‌های  $I$  را با استفاده از رشته PRI تشکیل می‌دهیم.

$$\begin{cases} D_i = \min_{j=1,2,\dots,i-1} |p_i - p_j| \\ I_i = \arg \min_j |p_i - p_j|; \begin{cases} i = 2, 3, \dots, N \\ j = 1, 2, \dots, i-1 \end{cases} \\ D_1 = 0, \quad I_1 = 1 \end{cases} \quad (31)$$

در واقع  $I_i$  اندیس نزدیکترین PRI ماقبل به  $p_i$  است. خوشه بندی بر مبنای رشته فواصل  $D$  صورت می‌گیرد. مجموعه نماینده خوشه‌ها  $E$  به صورت رابطه (32) تعیین می‌شود.

$$\begin{cases} E_H = \{i \mid D_i > a(p_i + p_{I_i})\} \\ E = E_H \cup I_{E_H} \end{cases} \quad (32)$$

که  $a$  را عددی در حدود 1 تا 5 درصد انتخاب می‌کنیم که هر چه کوچکتر باشد تعداد خوشه‌ها بیشتر و پراکندگی هر خوشه کمتر می‌شود.

با تعیین نماینده خوشه‌ها، تعداد خوشه‌ها به صورت خودکار مشخص شده و خوشه‌بندی رشته PRI را می‌توان کامل کرد. به خوشه‌ای تعلق خواهد داشت که کمترین فاصله از نماینده آن خوشه را داشته باشد. در این صورت  $L$  خوشه تشکیل خواهد شد که هر خوشه با تعداد اعضای  $I_i$  ( $i = 1, 2, \dots, L$ ) به صورت یک ماتریس  $C_{2 \times L_i}$  بیان می‌شود.

$$C = \left\{ C^i = \begin{bmatrix} p_{Q_i^1} & p_{Q_i^2} & \dots & p_{Q_i^{L_i}} \\ t_{Q_i^1} & t_{Q_i^2} & \dots & t_{Q_i^{L_i}} \end{bmatrix}; i = 1, 2, \dots, L \right\} \quad (33)$$

در رابطه (33)  $Q^i$  مجموعه اندیس‌های به صورت صعودی مرتب شده خوشه نام و  $C$  مجموعه کل خوشه‌ها است. برای تخمین مقدار PRI خوشه نام از رابطه (5) استفاده می‌کنیم. برای به کار بردن رابطه (5) به کل زمان ورودهای سازنده PRI‌های خوشه نام  $t^{C_i}$  نیاز است.

$$t^{C_i} = \{t_{Q_i^1} \cup t_{Q_i^{L_i}}\} \quad (34)$$

در نتیجه

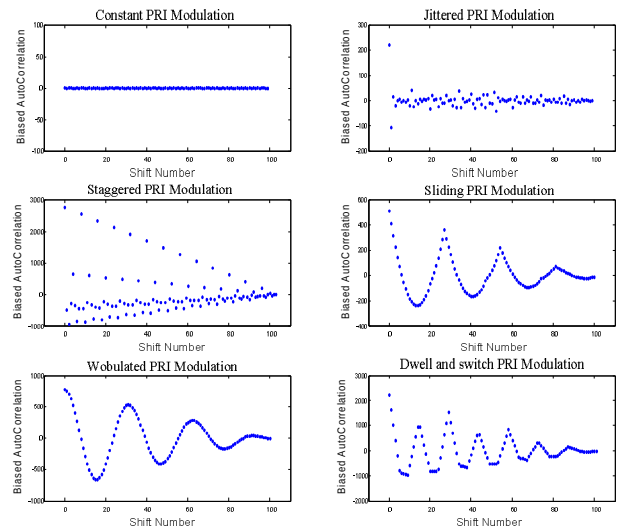
$$\begin{cases} \hat{T}_i = \left[ \sum_{n=0}^{N_i} (n - \frac{N_i}{2}) t_n^{C_i} \right] \frac{12}{N_i(N_i+1)(N_i+2)} \\ N_i = \|t^{C_i}\| - 1 \end{cases} \quad (35)$$

که  $\|x\|$  بیانگر تعداد اعضای مجموعه  $X$  است.

تخمین دیگری که برای  $\hat{T}_i$  می‌توان به کار برد به صورت زیر است.

$$\hat{T}_i = \frac{1}{L_i} \sum_{j=1}^{L_i} p_{Q_j^i} \quad (36)$$

تخمین (36) ساده‌تر و تخمین (35) تخمین دقیق‌تری است.



شکل (7): تابع خودهمبستگی بایاس شده انواع مدولاسیون‌های PRI

اگر  $f$  به صورت یک متغیر تصادفی یکنواخت بین صفر تا  $2\pi$  در نظر گرفته شود رابطه (27) را به صورت زیر ساده می‌کنیم.

$$C_p^{Wobul}(k) = \frac{N-k}{N} \frac{A^2}{2} \cos(wk) \quad (28)$$

مدولاسیون Dwell and switch دارای  $M$  سطح PRI است که هر سطح  $T_i; i = 0, 1, \dots, M-1$  به تعداد  $r_i; i = 0, 1, \dots, M-1$  تکرار می‌شود [4].

$$p_n^{DS} = T_{q(n)} + s v_n; \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (29)$$

که  $q(n)$  کوچکترین عدد صحیحی است که

$$\sum_{i=0}^{q(n)} r_i > (n-1) \bmod \left( \sum_{i=0}^{M-1} r_i \right) \quad (30)$$

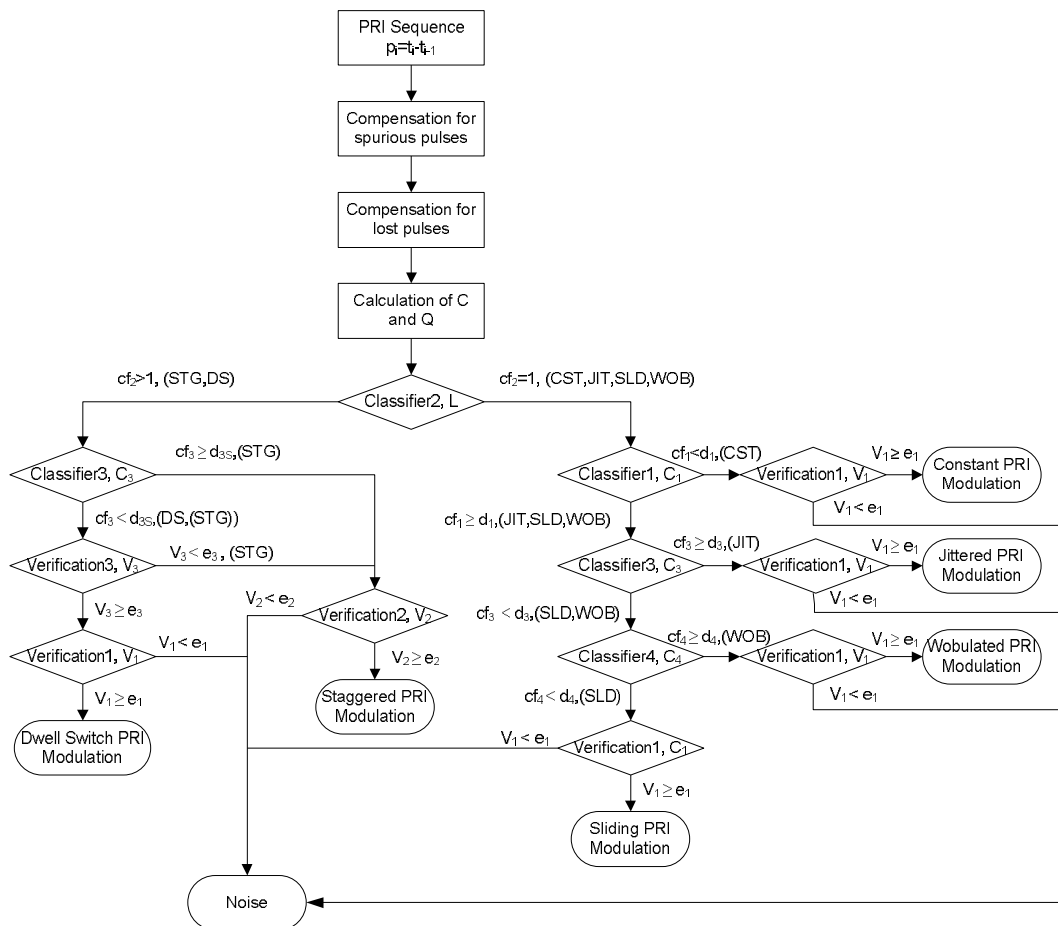
می‌توان اثبات کرد تابع خود همبستگی بایاس شده بدون نویز  $C_p^{DS}(k)$  یک تابع تکه‌ای خطی با شیب‌های متفاوت است و اولین نقطه تغییر شیب در  $k = \min(r_i)$  رخ می‌دهد. نقاط تغییر شیب زیر مجموعه  $\left\{ \sum_{i \in D} r_i \right\}$  هستند. که  $D$  کلیه انتخاب‌های  $j$  از مجموعه  $\{0, 1, 2, \dots, M-1\}$  است.

در شکل 7 تابع خود همبستگی بایاس شده رشته PRI انواع مدولاسیون‌های نشان داده شده در شکل 6 مشاهده می‌شود. در بخش بعد روشی برای تشخیص سطوح PRI ارائه می‌شود.

## 2-5- تشخیص سطوح PRI

تشخیص سطوح PRI مدولاسیون‌ها در شناسایی رادارها بسیار مهم است. در این مقاله برای تشخیص سطوح PRI از روشی بر مبنای خوشه‌بندی سلسله مراتبی [13] استفاده شده است. از این روش در شناسایی مدولاسیون PRI نیز استفاده می‌شود.





شکل (8): روند روش ارائه شده برای تشخیص انواع مدولاسیون های PRI

### 3- تشخیص انواع مدولاسیون PRI

برای تشخیص انواع مدولاسیون PRI به کلاسیفایرهایی برای بندی مدولاسیون ها احتیاج است. در این مقاله از کلاسیفایرهایی بر مبنای ویژگی های تابع خودهمبستگی بایاس شده و همچنین تعداد خوشه های رشته PRI استفاده شده است.

در شکل 8 روند تشخیص انواع مدولاسیون PRI آورده شده است. کلاسیفایرهایی اشاره شده برای رشته PRI ایده آل به دست آمده اند، در حالیکه در عمل پالس های اضافه و گم شده باعث تغییر خصوصیات مدولاسیون های PRI می شوند. بنابراین ابتدا اثر پالس های اضافه شده و سپس اثر پالس های گم شده را جبران می کنیم. در بلوک جبران کننده اثر پالس های اضافه، پالس هایی را که باعث ایجاد PRI های کوچک نسبت به PRI های مجاز در رشته  $p_n$  شده اند، حذف می شوند. در بلوک جبران کننده اثر پالس های اضافه شده، از خاصیت بیان شده در رابطه (11) مبنی بر ایجاد سطوح PRI برابر ترکیب خطی سطوح دیگر استفاده می کنیم و PRI های ناشی از ترکیب خطی سطوح دیگر و نیز PRI های بزرگتر از محدوده مجاز را حذف می کنیم. با حذف اثر پالس های گم شده و اضافه شده، رشته PRI حاصل شده را برای تشخیص مدولاسیون PRI استفاده می نماییم.

اولین ویژگی متمایز کننده مدولاسیون Constant PRI از سایر مدولاسیون ها، تغییرات بسیار اندک در رشته PRI آن است. چون تابع خودهمبستگی در  $k=0$  بیانگر تغییرات تابع است، اولین کلاسیفایر را به صورت زیر تعریف می کنیم.

$$\text{Classifier 1: } cf_1 = \frac{\sqrt{C(0)}}{T} \quad (37)$$

در خوشه بندی رشته PRI با مقدار  $a$  رابطه (32) در حدود یک تا دو درصد، تعداد خوشه های تشکیل شده  $L$  به عنوان معیاری برای تشخیص مدولاسیون ها است. برای مدولاسیون های Constant، Sliding Jittered و Wobulated که فاصله سطوح PRI معمولاً بسیار نزدیک است، معمولاً یک خوشه و برای مدولاسیون های Staggered و Dwell Switch به تعداد سطوح اصلی PRI خوشه تشکیل می شود. بنابراین

$$\text{Classifier 2: } cf_2 = L \quad (38)$$

از میان مدولاسیون های Sliding Jittered و Wobulated، تفاوت مقدار تابع خودهمبستگی بایاس شده در  $k=1$  و  $k=0$  در مدولاسیون Jittered بسیار بیشتر است. این تفاوت بین مدولاسیون های Staggered و Dwell Switch در مدولاسیون Staggered

نسبتا بیشتر است. کلاسیفایر سوم را به صورت رابطه (39) تعریف می-کنیم.

$$\text{Classifier 3: } cf_3 = 1 - C(1)/C(0) \quad (39)$$

کلاسیفایر بعدی را برای تشخیص مدولاسیون Sliding از مدولاسیون Wobulated به صورت زیر تعریف می-کنیم.

$$\text{Classifier 4: } cf_4 = \left| \frac{C(k_{peak}/2)}{C(0)} \right| + \frac{3k_{peak}}{8N} \quad (40)$$

که  $k_{peak}$  اندیس اولین و بزرگ-ترین پیک  $C(k)$  بعد از  $k=0$  است و اگر  $C(k)$  هیچ پیکی نداشته باشد،  $k_{peak} = N-1$  در حالت خاصی که  $N = nk_{peak}$  و  $n$  عدد صحیح بزرگتر از 2 باشد، داریم:

$$\begin{cases} cf_4^{Sliding} = (4n+1)/8n \\ cf_4^{Wobulated} = (8n-1)/8n \end{cases} \quad (41)$$

مقدار  $cf_4$  برای مدولاسیون Sliding کمتر از مقدار  $cf_4$  برای مدولاسیون Wobulated است و می-توان از آن در تشخیص این دو مدولاسیون استفاده کرد.

پس از استفاده از کلاسیفایرها، برای اطمینان از معتبر بودن نتیجه، درستی نوع مدولاسیون تشخیص داده شده را مورد بررسی قرار می-دهیم.

مطابق رابطه (33) رشته PRI به  $L$  خوشه تقسیم می-شود. رشته PRI خوشه نام را به صورت زیر تعریف می-کنیم.

$$p_n^{C_i} = t_{Q_{n+1}^{C_i}} - t_{Q_n^{C_i}}; \begin{cases} n=1, 2, \dots, l_i-1 \\ i=1, 2, \dots, L \end{cases} \quad (42)$$

این رشته در حالت ایده آل برای خوشه-های تمام انواع مدولاسیون PRI به جز مدولاسیون Staggered مقادیری برابر  $\hat{T}_i$  دارد. برای مدولاسیون Staggered این رشته مقادیری برابر  $\sum_{i=1}^L \hat{T}_i$  خواهد داشت. بنابراین برای بررسی درستی تشخیص، از رابطه (44) برای مدولاسیون Staggered و از رابطه (43) برای سایر انواع مدولاسیونها استفاده می-کنیم.

$$V_1 = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \frac{\sum_{n=1}^{l_i-1} u(e_1 - |1 - p_n^{C_i} / \hat{T}_i|)}{l_i - 1} \quad (43)$$

$$V_2 = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \frac{\sum_{n=1}^{l_i-1} u(e_2 - |1 - p_n^{C_i} / \sum_{i=1}^L \hat{T}_i|)}{l_i - 1} \quad (44)$$

که  $u(x)$  تابع پله واحد است و  $e_1$  و  $e_2$  مقادیر ثابتی برای بیان میزان نزدیکی مقادیر رشته PRI خوشه به مقدار  $\hat{T}_i$  و  $\sum_{i=1}^L \hat{T}_i$  است. متغیرهای  $V_1$  و  $V_2$  میزان پشت سر هم بودن PRI های هر سطح مدولاسیون را نشان می-دهند و با استفاده از آنها از تشخیص نویزهایی

که تشکیل سطح PRI می-دهند، به عنوان سیگنال مجاز جلوگیری می-نماییم.

همانطور که در بخش قبل اشاره شد تابع خود همبستگی بایاس شده رشته PRI مدولاسیون Dwell and switch یک تابع تکه‌ای خطی است. مشتق دوم توابع تکه‌ای خطی در تمام نقاط به جز نقاط تغییر شیب برابر صفر است، بنابراین برای بررسی درستی تشخیص این مدولاسیون و عدم تشخیص مدولاسیون Staggered به عنوان مدولاسیون Dwell and switch از معیار  $V_3$  استفاده می-کنیم.

$$V_3 = \frac{\sum_{k=1}^{k_{peak}-1} u(e_3 - \frac{|C(k+1) - 2C(k) + C(k-1)|}{C(0)})}{k_{peak} - 1} \quad (45)$$

$e_3$  مقدار ثابتی است که میزان کوچکی مشتق دوم  $C(k)$  یا  $C(k+1) - 2C(k) + C(k-1)$  را تنظیم می-کند.

در مدولاسیون‌های Staggered, Sliding, Wobulated و Dwell and switch الگوی مدولاسیون بعد از چندین پالس تکرار می-شود [4]. دوره تکرار مدولاسیون را برای این انواع مدولاسیونها به صورت رابطه (46) به دست می-آوریم.

$$\hat{T}_{period} = \sum_{i=1}^{k_{peak}} p_i \quad (46)$$

#### 4- نتایج شبیه‌سازی

شکل‌ها در این قسمت برای تست عملکرد روش مطرح شده در این مقاله، داده‌های پانزده رادار متفاوت با پارامترها و انواع مدولاسیون‌های PRI مختلف مطابق جدول 1 شبیه‌سازی شده است. رادارها برای جستجوی محیط، جهت بیم آنتن خود را تغییر می-دهند، از این رو گیرنده سیستم پشتیبان جنگ الکترونیک، مدت زمان کمی سیگنال رادار فرستنده را دریافت می-کند. ستون ششم جدول 1 متوسط این زمان را نشان می-دهد.

سیگنال‌های شبیه‌سازی شده دارای تغییرات PRI تا 30 درصد میانگین PRI های آن هستند. در ستون هفتم جدول میانگین PRI ها و در ستون بعد انواع مدولاسیون PRI به صورت خلاصه آمده است. اعداد جلوی مدولاسیون‌های Staggered و Dwell and Switch بیانگر تعداد سطوح PRI آنها است.

دقت مقادیر رشته PRI محاسبه شده از رشته TOA معمولاً بسیار بالاست [4] و با مقدار ثابت خوشه بندی  $a = 0.02$  در رابطه (32) تعداد خوشه های صحیح ایجاد خواهند شد. تغییرات رشته PRI در مدولاسیون PRI Constant بسیار اندک است و آستانه  $d_1 = 0.01$  مقدار مناسبی برای تشخیص این مدولاسیون از سایر مدولاسیون های PRI است. با توجه به شکل 7 و میزان اختلاف نمونه های اول و دوم تابع خودهمبستگی بایاس شده انواع مدولاسیون های PRI مقادیر آستانه  $d_3 = 0.8$  و  $d_{35} = 0.6$  را در مورد استفاده قرار می-دهیم.



جدول (1): پارامترهای رادارهای سناریوی تعیین شده

| Emitter number | AOA (°) | PW (us) | RF (MHz) | RF Mode | Illumination Time / 1Sec | PRI (us) | PRI Modulation | Pulse number | Lost Pulses(%) | Spurious Pulses(%) |
|----------------|---------|---------|----------|---------|--------------------------|----------|----------------|--------------|----------------|--------------------|
| 1              | 46.0    | 1.6     | 700      | CST     | 50 msec                  | 900      | STG-3          | 160          | 5              | 15                 |
| 2              | 47.5    | 8.3     | 1450     | JIT     | 27 msec                  | 3000     | CST            | 27           | 10             | 10                 |
| 3              | 45.8    | 12      | 2650     | JIT     | 65 msec                  | 1000     | SLD            | 195          | 2              | 5                  |
| 4              | 49.8    | 34      | 4000     | DS      | 120 msec                 | 350      | DS-4           | 1030         | 15             | 10                 |
| 5              | 65.8    | 5.8     | 2000     | CST     | 1000 msec                | 900      | WOB            | 3330         | 5              | 5                  |
| 6              | 65.5    | 49      | 3000     | JIT     | 45 msec                  | 800      | CST            | 170          | 10             | 10                 |
| 7              | 66.3    | 27      | 4500     | CST     | 60 msec                  | 140      | JIT            | 1300         | 15             | 15                 |
| 8              | 132     | 63      | 2300     | CST     | 80 msec                  | 650      | SLD            | 370          | 10             | 15                 |
| 9              | 131     | 47      | 7000     | DS      | 65 msec                  | 2400     | CST            | 80           | 10             | 15                 |
| 10             | 116     | 32      | 6500     | JIT     | 170 msec                 | 100      | JIT            | 5100         | 15             | 20                 |
| 11             | 166     | 51      | 3300     | CST     | 50 msec                  | 400      | STG-5          | 375          | 5              | 5                  |
| 12             | 54      | 35      | 2900     | CST     | 140 msec                 | 1200     | STG-8          | 350          | 5              | 10                 |
| 13             | 245     | 2.1     | 14000    | DS      | 75 msec                  | 75       | DS-7           | 3000         | 10             | 10                 |
| 14             | 267     | 0.5     | 9500     | DS      | 60 msec                  | 4        | JIT            | 45000        | 5              | 15                 |
| 15             | 323     | 1       | 9500     | JIT     | 35 msec                  | 25       | DS-2           | 4200         | 10             | 10                 |

PRI را به دست آورده و یک روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی برای جداسازی سطوح PRI ارائه شد. براین اساس روشی بر اساس ویژگی‌های تابع خودهمبستگی بایاس شده و خوشه‌های ایجاد شده طراحی گردید. شبیه‌سازی‌های انجام گرفته نشان می‌دهند روش پیشنهادی برای پردازش سیگنال و شناسایی رادارها در سیستم‌های پشتیبان جنگ الکترونیک مفید و کارآمد می‌باشد.

## مراجع

- [1] R. Wiley, ELINT: The Interception and Analysis of Radar Signals, Artech House, 2006.
- [2] G.P. Noone, "A neural approach to automatic pulse repetition interval modulation recognition," Proc. Information, Decision and Control, IEEE, pp. 213-218, 1999.
- [3] G.P. Noone, "A neural approach to tracking radar pulse repetition interval modulations," Proc. Neural Information Processing, IEEE, Vol. 3, pp. 1075-1080, 1999.
- [4] Y. Ryoo and K. Song, "Recognition of PRI Modulation Types of Radar Signals Using the Autocorrelation," IEICE Transactions on Communications, 2007.
- [5] H. Mardia, "New techniques for the deinterleaving of repetitive sequences," IEE proc. F, Communication, Radar and Signal Processing, Vol. 136, No. 4, pp. 149-154, 1989.
- [6] Y. Kuang and Q. Shi, "A Simple Way to Deinterleave Repetitive Pulse Sequences," 7<sup>th</sup> WSEAS Int. Conf. on Mathematical Methods and Computational Techniques in Electrical Engineering, Sofia, pp. 218-222, 2005.

می‌توان اثبات کرد که مقدار بهینه برای آستانه کلاسیفایر  $cf_4$  برابر  $d_4 = 0.75$  است. با توجه به دقت مقادیر رشته PRI و همچنین تابع خودهمبستگی بایاس شده مقادیر آستانه دسته بندی در رابطه‌های (43) و (44) و (45) را به صورت  $e_1 = e_2 = 4e_3 = 0.02$  مورد استفاده قرار می‌دهیم. در رشته PRI مربوط به یک سیگنال رادار مقادیر سطوح PRI با فاصله یکسان از هم تکرار می‌شوند و در حالت بدون نویز مقادیر متغیرهای  $V_1$  و  $V_2$  برابر یک خواهد بود و حضور نویز باعث کاهش این مقادیر خواهد شد. مقادیر آستانه  $e_1 = e_2 = 0.8$  را برای کاهش اعلام نویز به عنوان یک نوع مدولاسیون PRI انتخاب کرده ایم. با شبیه سازی‌های انجام گرفته مقدار آستانه  $e_3 = 0.3$  برای عدم تشخیص مدولاسیون Staggered به عنوان مدولاسیون Dwell and switch به دست آمد. روش تشخیص مدولاسیون PRI ارائه شده در این مقاله، با داده‌های جدول 1 مورد تست قرار گرفت و تمامی رادارهای موجود با وجود پالس‌های اضافه و گم شده به درستی شناسایی شدند.

## 5- نتیجه‌گیری

در محیط‌های جنگ الکترونیک مدرن، نوع مدولاسیون PRI و همچنین تعداد و مقدار سطوح PRI یک رادار اطلاعات مهمی جهت شناسایی و دنبال کردن پالس‌های آن بشمار می‌رود. در این مقاله مدلی برای زمان ورود پالس‌ها و نویزهای آن ارائه شد. برای مقادیر سطوح PRI تخمینی بر اساس حداقل مربعات خطا در رشته TOA به دست آمد. تابع خودهمبستگی بایاس شده برای انواع مدولاسیون‌های

- [7] P. Hansson, "Analysis of some methods for deinterleaving of pulse trains," MS thesis, KTH University, Nov. 2007.
- [8] Merrill I. Skolnik, RADAR HANDBOOK, Third Edition, McGraw-Hill, 2008.
- [9] D.J. Milojevic and B.M. Propovic, "Improved algorithm for the deinterleaving of radar pulses," IEE proc. F, Communication, Radar and Signal Processing, Vol. 139, No. 1, pp. 98-104, 1992.
- [10] D.E Driscoll and S.D. Howard, "The detection of radar pulse sequences by means of a continuous wavelet transform," ICASSP'99 proceeding, Vol. 3, pp. 1389-1392, 1999.
- [11] P.S. Ray, "A Novel Pulse TOA Analysis Technique for Radar Identification," IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 34, No. 3, pp. 716-721, July 1998.
- [12] B.K. Slocumb, "Adaptive Data Association Methods for Pulse Train Analysis and Deinterleaving," PHD's thesis, Georgia Institute of Technology, 1998.
- [13] W. Koontz and P. Narendra and K. Fukunaga, "A Graph-Theoretic Approach to Nonparametric Cluster Analysis," IEEE Transactions on Computers, Vol. 25, No. 9, pp. 936-944, 1976.

## زیرنویس‌ها

- 
- <sup>1</sup> Time of Arrival
  - <sup>2</sup> Radio Frequency
  - <sup>3</sup> Pulse Width
  - <sup>4</sup> Pulse Amplitude
  - <sup>5</sup> Angle of Arrival
  - <sup>6</sup> Pulse Repetition Interval
  - <sup>7</sup> Sequential Differential Histogram
  - <sup>8</sup> Sequence Search
  - <sup>9</sup> Hierarchical Clustering

