تشخیص مدولاسیون فاصله تکرار پالس‌های راداری

معین احمدی [1] **کمال محامدپور** [2]

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران- ایران
moein@ee.kntu.ac.ir
2- دانشیار، دانشکده مهندسی کامپیوتر- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران- ایران
kmpour@kntu.ac.ir

چکیده: در یک محیط پرتراکم جنگ الکترونیک سیگنال های 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

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.6- No.2- Fall & Winter 2009
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-19]

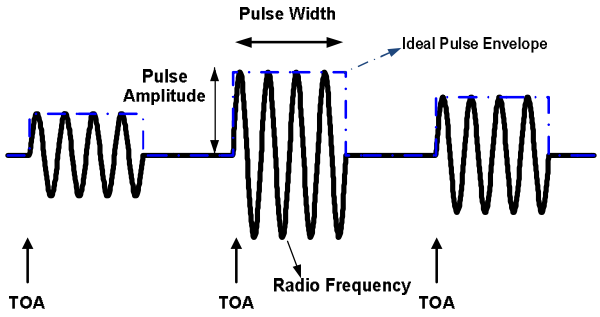
1- مقدمه

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)[1]، فرکانس رادیویی (RF)[2]، پهنای پالس (PW)[3]، دامنه پالس (PA)[4] و زاویه ورود پالس (AOA)[5] می‌باشد. با پیشرفت رادارهای پالسی، این رادارها از مدولاسیون‌های پیچیده‌تری برای فاصله تکرار پالس‌ها (PRI)[6] 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[7] و جستجوی رشته[8] [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[9] ارائه می‌گردد. دربخش 3 طرح تشخیص مدولاسیون و سطوح PRI ارائه می‌شود. در بخش4 عملکرد روند ارائه شده در یک سناریو شبیه‌سازی می‌گردد.

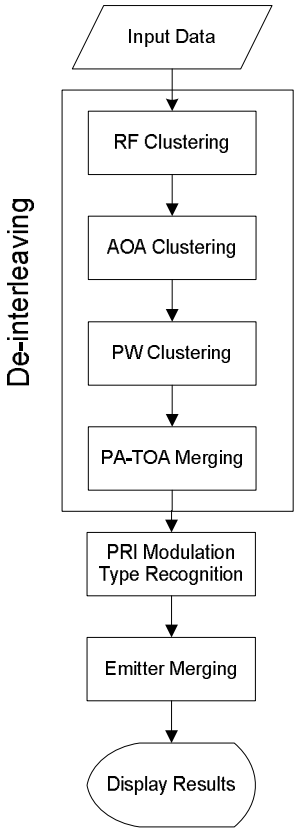
2- پارامترهای پالس‌های راداری

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



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 تاثیری 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 اندازه گیری آن از دقت کمتری برخوردارند. دامنه پالس‌ها به صورت غیر خطی تغییر می‌کنند و معمولا 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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-19]

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.

2-1- 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 بیان‌می‌گردد[10 و 11].

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

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. t_n^{ideal} برای یک رشته پالس با فاصله ثابت به صورت زیر است.

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

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.

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

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

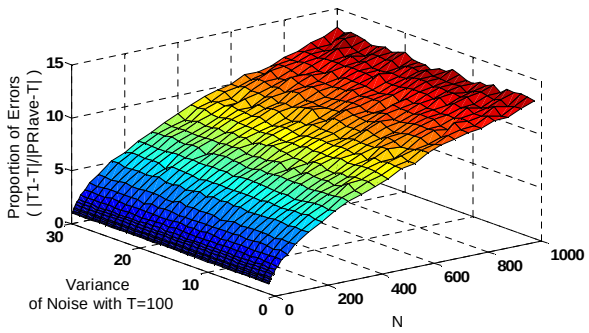
$$\begin{cases} \dfrac{\partial e^2}{\partial T} = 0 \Rightarrow \sum_{n=0}^{N} n(t_n - nT - f) = 0 \\ \dfrac{\partial e^2}{\partial f} = 0 \Rightarrow \sum_{n=0}^{N} (t_n - nT - f) = 0 \end{cases} \qquad (4)$$

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

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

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

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

با جایگذاری t_n از رابطه (1) داریم:

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

که T_n فاصله بین پالس nام 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.

$$z_n \sim \mathrm{N}(0,1)\ \ ,\ \ C_z(k) = d(k) \qquad (8)$$

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

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

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.

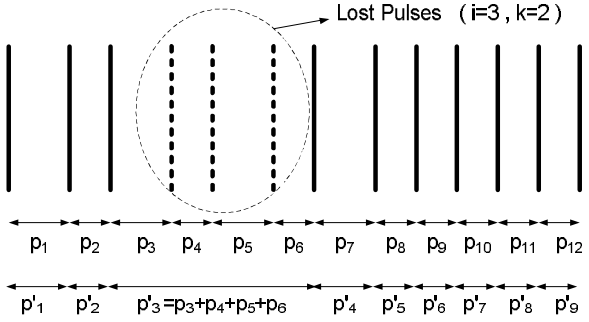
$$C_v(k) = 2d(k) - d(k+1) - d(k-1) \qquad (10)$$

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].

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-19]



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

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

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

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.

$$p_n^{Lost} = p_n^L \; ; \; p_n^l = f(p^{l-1}, i_{l-1}, k_{l-1}) \; , \; l=1,2,...,L \qquad (12)$$

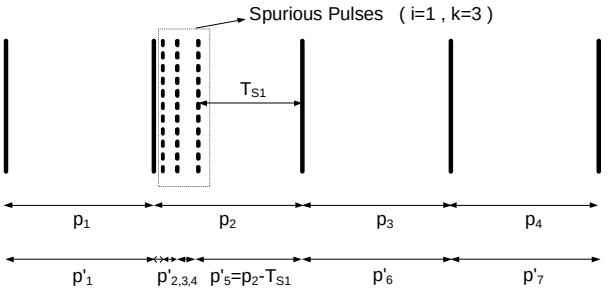
که p^{l-1} رشته PRI ایجاد شده ناشی از دسته $l-1$ ام پالس‌های گم شده است و $p_n^0 = p_n$. همانطور که از رابطه (11) پیداست گم شدن پالس‌ها سبب ایجاد سطوح PRI برابر با ترکیب خطی سایر سطوح واقعی موجود در رشته PRI اصلی می‌شود. از این موضوع در تصحیح رشته PRI برای جبران اثر پالس های گم شده استفاده می‌شود.

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 عموما با فاصله‌ای نزدیک به یک پالس واقعی افزوده می‌شوند. اگر به پالس iام رشته $\{p \mid p_n \; ; n=1,2,...,N\}$ به تعداد k پالس افزوده شود رشته PRI جدید $\{p' \mid p'_n \; ; n=1,2,...,N+k\}$ تشکیل خواهد شد.

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

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



شکل (5): 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.

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

که p^{m-1} 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 مدولاسیون های PRI متفاوتی استفاده می‌کنند. در شکل 6 انواع مدولاسیون‌های Constant، Jittered، Staggered، Sliding، Wobulated و Dwell 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].

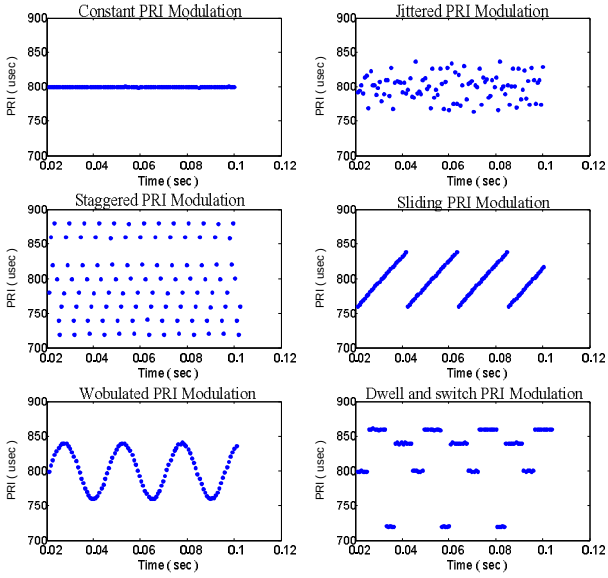
$$\begin{cases} t_n^{Cons} = nT + f + s \; z_n \; ; \; n=0,1,2,...,N \\ p_n^{Cons} = T + s \; v_n \quad ; \; n=1,2,...,N \end{cases} \qquad (15)$$

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 معمولا از یک درصد مقدار T کمتر است[1]. تابع خودهمبستگی بایاس شده رشته PRI را برای این مدولاسیون PRI به ازای $k \geq 0$ بصورت رابطه (16) به دست می آوریم.

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

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.6- No.2- Fall & Winter 2009

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-19]



شکل (6): انواع مدولاسیون‌های PRI

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

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

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 می آوریم.

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

مدولاسیون Staggered دارای M سطح PRI به صورت $T_i; i = 0,1,...,M-1$ 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.

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

اپراتور mod بیانگر باقیمانده تقسیم n بر M است.

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

که در آن

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

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

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

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.

$$\begin{aligned} C_p^{Slid}(k) = \tfrac{1}{N}[& \\ & (\tfrac{N-k-N'}{M} h_1(M) + h_1(N'))(k \bmod M)^2 + \\ & (\tfrac{N-k-N'}{M} h_2(M) + h_2(N'))(k \bmod M) + \\ & (\tfrac{N-k-N'}{M} h_3(M) + h_3(N'))] + \\ & s^2(2d(k) - d(k-1)) \end{aligned} \tag{23}$$

که در آن

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

و

$$\begin{cases} h_1(x) = \dfrac{T_{Step}^2}{2} x \\ h_2(x) = T_{Step}^2\, x(1 - \dfrac{x}{2}) - TT_{Step} \\ h_3(x) = \dfrac{T_{Step}^2}{3} x^3 - T_{Step}(T + \dfrac{T_{Step}}{2})x^2 + (T^2 + \dfrac{T_{Step}^2}{6})x + T^2 \end{cases} \tag{25}$$

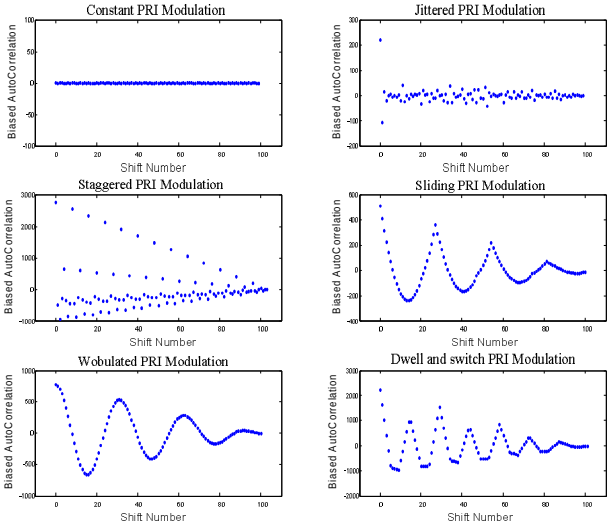
نوع دیگر مدولاسیون PRI، مدولاسیون Wobulated است. تغییرات سینوسی در رشته PRI این مدولاسیون با دامنه تقریبا 5 درصد میانگین PRI و فرکانس در حدود 50 هرتز است [1]. رشته PRI مدولاسیون Wobulated به صورت رابطه (26) است.

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

که w 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.

$$\begin{aligned} C_p^{Wobul}(k) = & \frac{A^2}{2N}[(N-k)\cos(wk) - \\ & \frac{\cos(w(N-k+1))\sin(w(N-k+1))}{\sin(w)} \\ & [\cos(wk+2f) - \sin(wk+2f)\tan(w(N-k+1))] - \\ & \frac{N-k}{N^3} A^2 \frac{\sin^2(\frac{wN}{2})\cos^2(\frac{w(N+1)}{2})}{\sin^2(\frac{w}{2})} \\ & (\sin f + \cos f \tan(\tfrac{w(N+1)}{2}))^2 - \\ & \frac{2A^2}{N^2} \frac{\sin(\frac{wN}{2})\cos(\frac{w(N+1)}{2})}{\sin^2(\frac{w}{2})} \sin(\tfrac{w(N-k)}{2}) \sin(\tfrac{w(N-k+1)}{2}) \\ & \cos(\tfrac{wk}{2})(\sin f + \cos f \tan(\tfrac{w(N+1)}{2})) \\ & (\sin(\tfrac{wk}{2} + f) + \cos(\tfrac{wk}{2} + f)\tan(\tfrac{w(N-k+1)}{2}))] \end{aligned} \tag{27}$$

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.6- No.2- Fall & Winter 2009
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-19]



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

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

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

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

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

که $q(n)$ کوچکترین عدد صحیحی است که

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

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 jتایی $(j=1,2,...,M)$ از مجموعه $\{0,1,2,...,M-1\}$ 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.

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

$$\begin{cases} D_i=\min\limits_{j=1,2,...,i-1}\left|p_i-p_j\right| \\ I_i=arg\min\limits_j\left|p_i-p_j\right| \ ;\begin{cases} i=2,3,...,N \\ j=1,2,...,i-1 \end{cases} \\ D_1=0\ \ ,\ \ I_1=1 \end{cases} \qquad (31)$$

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.

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

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 خوشه ها به صورت خودکار مشخص شده و خوشه‌بندی رشته PRI را می‌توان کامل کرد. p_i 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 l_i $(i=1,2,...,L)$ به صورت یک ماتریس $C_{2\times l_i}^i$ بیان می‌شود.

$$C=\left\{C^i=\begin{bmatrix} p_{Q_1^i} & p_{Q_2^i} & ... & p_{Q_{l_i}^i} \\ t_{Q_1^i} & t_{Q_2^i} & ... & t_{Q_{l_i}^i} \end{bmatrix};i=1,2,...,L\right\} \qquad (33)$$

در رابطه (33) Q^i مجموعه اندیس‌های به صورت صعودی مرتب شده خوشه iام و C مجموعه کل خوشه‌ها است.

برای تخمین مقدار PRI خوشه iام از رابطه (5) استفاده می‌کنیم. برای به کار بردن رابطه (5) به کل زمان ورودهای سازنده PRIهای خوشه iام t^{c_i} نیاز است.

$$t^{c_i}=\{t_{Q^i}\ \mathbf{U}\ t_{Q^{i-1}}\} \qquad (34)$$

در نتیجه

$$\begin{cases} \hat{T}_i=\left[\sum\limits_{n=0}^{N_i}(n-\frac{N_i}{2})t_n^{c_i}\right]\dfrac{12}{N_i(N_i+1)(N_i+2)} \\ N_i=\left\|t^{c_i}\right\|-1 \end{cases} \qquad (35)$$

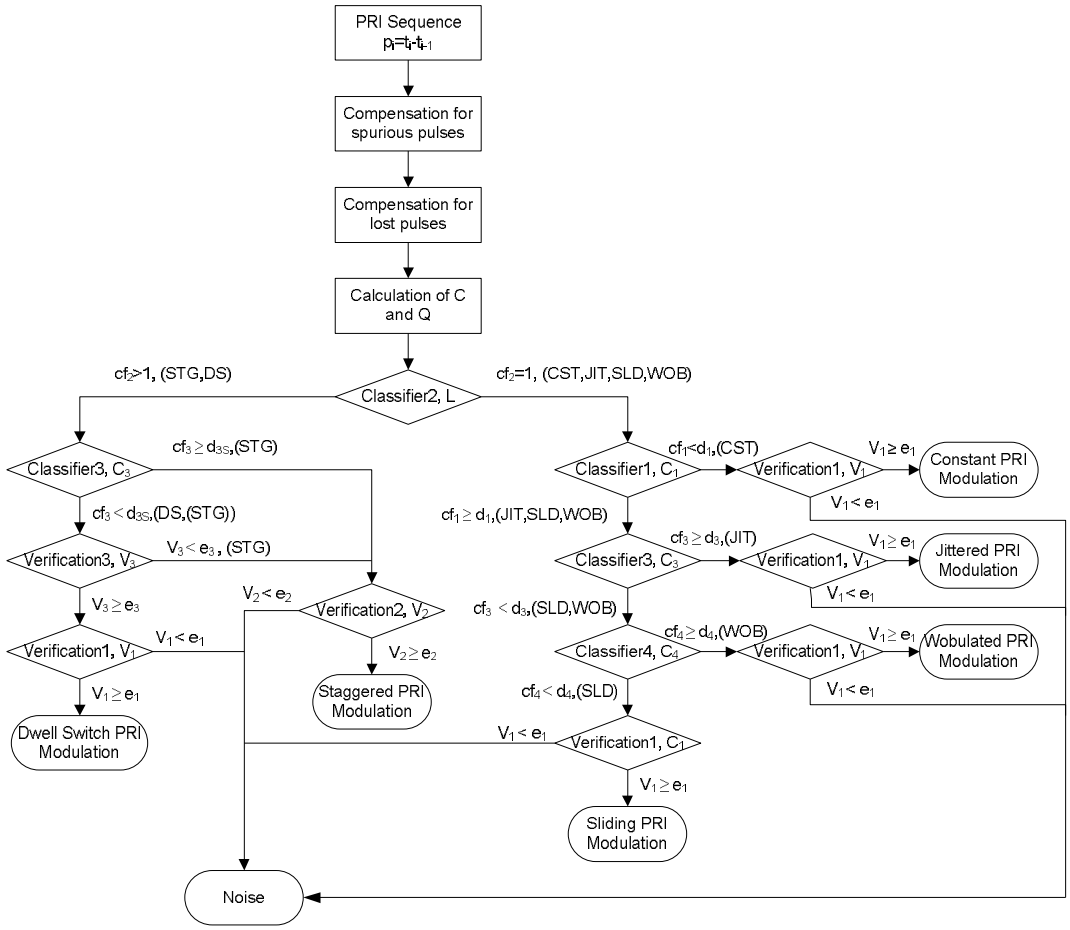
که $\|x\|$ بیانگر تعداد اعضای مجموعه x است.

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

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

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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-19]



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

3- تشخیص انواع مدولاسیون PRI

برای تشخیص انواع مدولاسیون PRI بـه کلاسـیفایرهایی بـرای دسـته بندی مدولاسیون‌ها احتیاج است. در این مقالـه از کلاسـیفایرهایی بـر مبنای ویژگی‌های تابع خودهمبستگی بایاس شـده و همچنـین تعـداد خوشه‌های رشته PRI استفاده شده است.

در شکل 8 روند تشخیص انواع مدولاسیون PRI آورده شده است. کلاسیفایرهای اشاره شده برای رشته PRI ایده‌آل به دست آمده‌اند، در حالیکه در عمل پالس‌های اضافه و گم شـده باعـث تغییـر خـصوصیات مدولاسیون‌های PRI می‌شوند. بنابراین ابتدا اثر پالس‌های اضافه شـده و سپس اثر پالس‌های گم‌شده را جبـران مـی‌کنـیم. در بلـوک جبـران کننده اثر پالس‌های اضافه، پالس‌هـایی را کـه باعـث ایجـاد PRIهـای کوچک نسبت به PRIهای مجاز در رشته p_n شده‌اند، حذف می‌شوند.

در بلوک جبران کننده اثر پالس‌های اضافه شده، از خاصیت بیـان شده در رابطه (11) مبنی بر ایجـاد سـطوح PRI برابـر ترکیـب خطـی سطوح دیگر استفاده می‌کنیم و PRIهای ناشی از ترکیب خطی سطوح دیگر و نیز PRIهای بزرگتر از محدوده مجاز را حذف می‌کنیم.

با حذف اثر پالس‌های گم‌شده و اضافه شـده، رشـته PRI حاصـل شده را برای تشخیص مدولاسیون PRI استفاده می‌نماییم.

اولین ویژگی متمایز کننده مدولاسـیون Constant PRI از سـایر مدولاسیون‌ها، تغییرات بسیار اندک در رشته PRI آن است. چون تـابع خودهمبستگی در k=0 بیانگر تغییرات تابع است، اولـین کلاسـیفایر را به صورت زیر تعریف می‌کنیم.

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

در خوشه بندی رشته PRI با مقدار a رابطه (32) در حدود یک تا دو درصد، تعداد خوشه‌های تشکیل شده L به عنوان معیاری بـرای تـشخیص مدولاسـیون‌هـا اسـت. بـرای مدولاسـیون‌هـای Constant، Jittered Sliding و Wobulated کـه فاصـله سـطوح PRI معمـولا بـسیار نزدیـک اسـت، معمـولا یـک خوشـه و بـرای مدولاسـیون‌هـای Staggered و Dwell and switch بـه تعـداد سـطوح اصـلی PRI خوشه تشکیل می‌شود. بنابراین

$$Classifier\ 2:\ cf_2 = L \qquad (38)$$

از میـان مدولاسـیون‌هـای Jittered، Sliding و Wobulated، تفـاوت مقـدار تـابع خودهمبـستگی بایـاس شـده در k=0 و k=1 در مدولاسیون Jittered بسیار بیشتر است. این تفاوت بـین مدولاسـیون-هـای Staggered و Dwell Switch در مدولاسـیون Staggered

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-19]

نسبتا بیشتر است. کلاسیفایر سوم را به صورت رابطه (39) تعریف می‌کنیم.

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

کلاسیفایر بعدی را برای تشخیص مدولاسیون Sliding از مدولاسیون Wobulated به صورت زیر تعریف می‌کنیم.

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

که k_{peak} اندیس اولین و بزرگ‌ترین 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:

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

مقدار cf_4برای مدولاسیون Sliding کمتر از مقدار cf_4 برای مدولاسیون Wobulated است و می‌توان 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 می‌دهیم.

مطابق رابطه (33) رشته PRI به L خوشه تقسیم می‌شود. رشته PRI خوشه iام را به صورت زیر تعریف می‌کنیم.

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

این رشته در حالت ایده آل برای خوشه‌های 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 می‌کنیم.

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

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

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 می‌دهند و با استفاده از آن‌ها از تشخیص نویزهایی که تشکیل سطح PRI می‌دهند، به عنوان سیگنال مجاز جلوگیری می‌نماییم.

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 می‌کنیم.

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

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

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

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

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 می‌دهند، از این رو گیرنده سیستم پشتیبان جنگ الکترونیک، مدت زمان کمی سیگنال رادار فرستنده را دریافت می‌کند. ستون ششم جدول 1 متوسط این زمان را نشان می‌دهد.

سیگنال‌های شبیه‌سازی شده دارای تغییرات PRI تا 30 درصد میانگین PRIهای آن هستند. در ستون هفتم جدول میانگین PRIها 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 معمولا 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 Constant PRI 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 $d_{3S}=0.6$ را در مورد استفاده قرار می‌دهیم.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-19]

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

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 رابطه های (43) و (44) و (45) را به صورت $e_1 = e_2 = 4e_3 = 0.02$ مورد استفاده قرار می دهیم. در رشته PRI مربوط به یک سیگنال رادار مقادیر سطوح PRI با فاصله یکسان از هم تکرار می شوند و در حالت بدون نویز مقادیر متغیر های 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 سازی های 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 PRI را به دست آورده و یک روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی برای جداسازی سطوح PRI ارائه شد. براین اساس روشی بر اساس ویژگی-های 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," 7th WSEAS Int. Conf. on Mathematical Methods and Computational Techniques in Electrical Engineering, Sofia, pp. 218-222, 2005.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-19]

[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

[1] Time of Arrival
[2] Radio Frequency
[3] Pulse Width
[4] Pulse Amplitude
[5] Angle of Arrival
[6] Pulse Repetition Interval
[7] Sequential Differential Histogram
[8] Sequence Search
[9] Hierarchical Clustering

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-19]