

ارائه الگوریتم شناسایی رادارها مبتنی بر فیلتر کالمن

علی ناصری*

استادیار دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۲/۰۴/۳۰، پذیرش: ۹۲/۰۶/۰۲)

چکیده

در جنگ الکترونیک، بخش پشتیبانی الکترونیک (ES) وظیفه شناسایی سیستم‌های مخابراتی و الکترونیکی طرف مقابل را به عهده دارد. رادارها مهم‌ترین بخش سیستم‌های الکترونیکی می‌باشند بنابراین، شناسایی رادارها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و این اهمیت به حدی است که تعیین کننده توان جنگ الکترونیکی ارتش مربوط است. تاکنون الگوریتم‌های زیادی برای شناسایی رادارها ارائه شده است. بیشینه دقتی که تاکنون این الگوریتم‌ها به دست داده‌اند با وجود پنج درصد پالس گمشده و پنج درصد نویز ۹۳٪ است. در مقاله حاضر، الگوریتمی ارائه می‌شود که با استفاده از فیلتر کالمن تعمیم یافته متوسط دقتی معادل ۹۷/۲٪ دارد. لازم به ذکر است که این الگوریتم دارای حجم محاسباتی معادل N^2 است که به دلیل داشتن معادله بازگشتی، می‌توان آن را با سیستم‌های پردازش موازی (آرایه‌های سیستم‌لیکی) پیاده‌سازی نمود.

واژه‌های کلیدی: کالمن فیلتر، جنگ الکترونیک، پشتیبانی الکترونیکی، الگوریتم، شناسایی.

۱. مقدمه

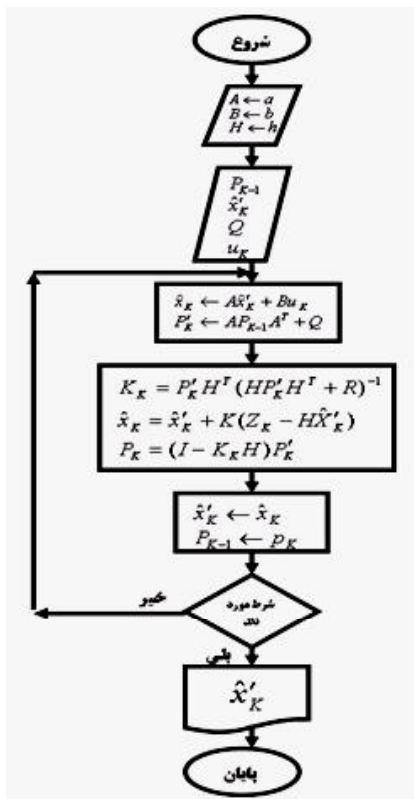
شکل ۱ الگوریتم فیلتر کالمن را نشان می‌دهد. در مدل مورد نظر ماتریس A و H را ثابت فرض نموده ولی می‌توان هر دو را متغیر با زمان یعنی A_k ، H_k در نظر گرفت.

روش‌های مختلفی برای جداسازی رشته پالس‌های متداخل راداری ارائه شده که با وجود پنج درصد پالس گمشده و پنج درصد نویز، متوسط دقتی معادل ۹۳٪ به دست خواهند داد [۱۱ و ۱۲]. این الگوریتم‌ها برای جداسازی رشته پالس متداخلی با N پالس، حجم عملیاتی معادل N^2 خواهند داشت [۳]. در مقاله حاضر، الگوریتمی که بر اساس فیلتر کالمن تعمیم یافته طراحی شده است، برای جداسازی رشته پالس‌های متداخل راداری ارائه می‌شود. معادلات کالمن فیلتر گسسته در مرحله به‌هنگام کردن زمان و اندازه‌گیری، در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: معادلات به‌هنگام کردن زمان و اندازه‌گیری [۱]

معادلات کالمن فیلتر گسسته در مرحله به‌هنگام کردن زمان	معادلات کالمن فیلتر گسسته در مرحله به‌هنگام کردن اندازه‌گیری
$\hat{x}'_k = A \hat{x}_{k-1} + B V_k$ $P'_k = A P_{k-1} A^T + Q$	$K_k = P'_k H^T (H P'_k H^T + R)^{-1}$ $\hat{x}_k = \hat{x}'_k + K_k (Z_k - H \hat{x}'_k)$ $P_k = (I - K_k H) P'_k$

در روابط جدول ۱، \hat{x}'_k متغیرهای حالت، A ماتریس حالت، B ماتریس ورودی، V نویز اندازه‌گیری، P ماتریس کواریانس تخمین ثانویه، Q نویز سیستم، I ماتریس یکه، K بهره کالمن، H ماتریس خروجی، R کواریانس نویز اندازه‌گیری و Z خروجی است.



شکل ۱: الگوریتم فیلتر کالمن [۲]

* ایمیل نویسنده پاسخگو: anaseri@ihu.ac.ir

در این الگوریتم با تخمین فاز و فرکانس تکرار پالس رشته پالس‌های متداخل شده توسط فیلتر کالمن تعمیم یافته، عملیات جداسازی و شناسایی رشته پالس‌ها و در نتیجه رادارها انجام می‌شود. فیلتر کالمن تعمیم یافته از مدل سیگنال موجود، طی دو مرحله زیر ساخته خواهد شد.

الف) خطی کردن $h_k^s(x_k)$ طبق روابط زیر:

$$H_k^s = [\dots, \partial h_k^s(x_k) / \partial f_k^{(i)}, \dots, \partial h_k^s(x_k) / \partial \theta_k^{(i)}, \dots]$$

$$\frac{\partial h_k^s}{\partial f_k^{(i)}} = k + 2k \cos(2\pi f_k^{(i)} k - \theta_k^{(i)})$$

$$\frac{\partial h_k^s}{\partial \theta_k^{(i)}} = -\frac{1}{2\pi} - \frac{1}{\pi} \cos(2\pi f_k^{(i)} k - \theta_k^{(i)})$$

ب) ساده کردن معادلات فیلتر کالمن تعمیم یافته به وسیله معادله حالت ثابت در مدل سیگنال، که نتایج آن در روابط زیر نشان داده شده است:

$$\hat{X}_{k+1/k} = \hat{X}_{k/k-1} + K_k [y_k - h_k(\hat{X}_{k/k-1})]$$

$$K_k = P_{k/k-1} H_k^s (H_k^s P_{k/k-1} H_k^s + R_k)^{-1}$$

$$P_{k+1/k} = P_{k/k-1} - K_k H_k^s P_{k/k-1} + Q_k$$

در روابط بالا، $\hat{X}_{k+1/k}$ تخمین فیلتر شده‌ای از X_{k+1} ، K_k بهره کالمن و $P_{k/k-1}$ ماتریس کواریانس خطا در اندازه معلوم k در $k-1$ است. تخمین ناهمواری سیگنال ورودی $h_k(\hat{X}_{k+1/k})$ در معادلات جدید حالت استفاده می‌شود.

در اینجا مقادیری اولیه با $\hat{X}_{0/-1} = \hat{X}_0$ صورت می‌گیرد و $\hat{X}_0 = [\hat{f}_0 \quad \hat{\theta}_0]$ و $P_{0/-1} = P_0$ می‌باشد.

۳. ارزیابی الگوریتم پیشنهادی

در این بخش، پنج محیط راداری با رادارهای متفاوت در قالب چهار حالت، جهت ارزیابی روش پیشنهادی مدنظر قرار گرفته است. رشته پالس متداخل هر محیط راداری توسط سیمولاتور پالس‌های متداخل راداری ارائه شده در مقاله [۱۳] تهیه شده و سپس با الگوریتم پیشنهادی، مورد شناسایی و جداسازی قرار گرفته است. لازم به توضیح است که الگوریتم پیشنهادی توسط نرم افزار مطلب پیاده‌سازی شده و نتایج حاصل برای حالت‌ها، خروجی نرم افزار ذکر شده می‌باشد.

حالت ۱: در این حالت، رشته پالس‌های متداخل چهار رادار با مشخصات جدول ۲ با سیمولاتور پالس‌های راداری [۱۳] با ۵٪ پالس گمشده و ۵٪ نویز تهیه شده و با الگوریتم پیشنهادی مورد شناسایی قرار گرفته‌اند.

همان‌طور که در فلوجارت شکل ۱ ملاحظه می‌شود، در مرحله اول ماتریس‌های A, B, H به‌عنوان ورودی به ماتریس اعمال می‌شود و همچنین مقادیر P, Q, x و u (ورودی) معلوم هستند. شرط موردنظر همان ورود همه پالس‌ها است و k اندیس زمان و یا زمان نمونه‌برداری یا فواصل پالس‌ها می‌باشد. الگوریتم تخمین کالمن فیلتر در دو مرحله به‌شرح زیر انجام می‌شود:

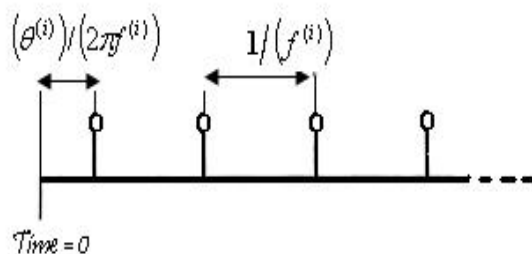
الف) به‌هنگام کردن که در این مرحله زمان با اضافه کردن K به سمت جلو حرکت کرده و با استفاده از متغیرهای حالت تخمین زده‌شده در مرحله قبل و ماتریس کواریانس نویز فرایند Q و ماتریس کواریانس تخمین ثانویه P_{k-1} در حالت قبل مقدار تخمین جدید حالت‌ها یعنی تخمین اولیه برای مرحله قبل به‌دست می‌آید. این بدان معناست که حالت‌ها پیش‌بینی شده و ماتریس کواریانس خطای تخمین اولیه P_k تشکیل می‌شود.

ب) به‌هنگام کردن اندازه‌گیری خروجی با استفاده از حالت‌های پیش‌بینی شده در مرحله قبل، صحت پیش‌بینی شده در مرحله قبل بررسی و در صورت وجود اختلاف، مقدار تخمین بهبود یافته و K_k و P_k و \hat{X}_k تخمین زده می‌شود.

در ادامه به الگوریتم پیشنهادی در بخش ۲، ارزیابی الگوریتم پیشنهادی در بخش ۳ و نتیجه گیری در بخش ۴ پرداخته می‌شود.

۲. الگوریتم پیشنهادی

در این بخش الگوریتمی ارائه می‌شود که در آن، جداسازی بر اساس اینکه رشته پالس‌های متداخل راداری دریافتی در گیرنده‌های ESM و ELITN، فرکانس‌های تکرار پالس و فازهای متفاوت دارند، انجام خواهد شد. در این روش برای مدل کردن سیگنال، فرض می‌شود که M تعداد منابع رشته پالس پریودیک باشد و $f^{(i)}$ و $\theta^{(i)}$ فرکانس تکرار پالس و فاز i امین منبع بوده و پالس‌ها به‌ازای $i \in [1, M]$ و $n=0, 1, 2, \dots$ به‌صورت متداخل دریافت شوند. با این فرضیه‌ها، در زمان‌های $(2\pi n + \theta^{(i)}) / (2\pi f^{(i)})$ سیگنال‌ها از منابع ارسال می‌شوند. سیگنال متداخل دریافت شده شامل ترکیبی از M رشته پالس تولید شده به‌وسیله منابع و t_1, t_2, \dots, t_N زمان‌های ورودی N پالس متوالی می‌باشد. شکل ۲ یک رشته از پالس و پارامترهای آن را نشان می‌دهد.



شکل ۲: نمایش پارامترهای یک رشته پالس [۲]

جدول ۳: مقادیر تخمین زده شده برای فاز و فرکانس تکرار پالس رادارهای جدول ۲

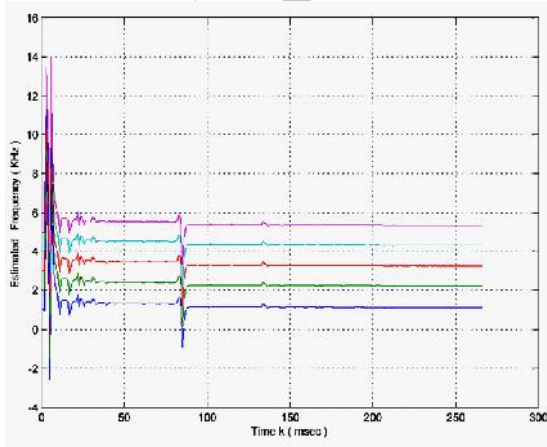
ردیف	مقدار تخمین زده شده فرکانس تکرار پالس (KHz)	مقدار تخمین زده شده فاز (Rad)
۱	۱/۳۸۲۴	۴/۱۹۱۵
۲	۱/۷۸۰۵	۵/۰۹۱۱
۳	۲/۰۰۵۶	۵/۱۷۶۲
۴	۲/۳۱۶۸	۲/۱۸۲۲
۵	۷/۶۵۶۰	۲/۲۴۰۵

حالت ۲: در این حالت نیز رشته پالس‌های متداخل پنج رادار با مشخصات جدول ۴ با سیمولاتور پالس‌های راداری [۱۳] با ۵٪ پالس گمشده و ۵٪ نویز تهیه شده و با الگوریتم پیشنهادی مورد شناسایی قرار گرفته‌اند.

جدول ۴: فرکانس تکرار پالس و فاز رادارهای محیط (حالت ۲)

ردیف	مقدار واقعی فرکانس تکرار پالس (KHz)	مقدار واقعی فاز (Rad)
۱	۵/۳۲۳۸	۵/۳۰۹۸
۲	۱/۷۳۶۴	۱/۰۳۸۳
۳	۳/۰۸۳۰	۴/۹۰۲۷
۴	۲/۷۵۹۶	۴/۴۹۵۸
۵	۴/۲۲۴۴	۲/۳۲۶۳

نمودارهای تخمین فاز و فرکانس تکرار پالس به دست آمده از روش پیشنهادی برای رادارهای با مشخصات جدول ۴ در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است.



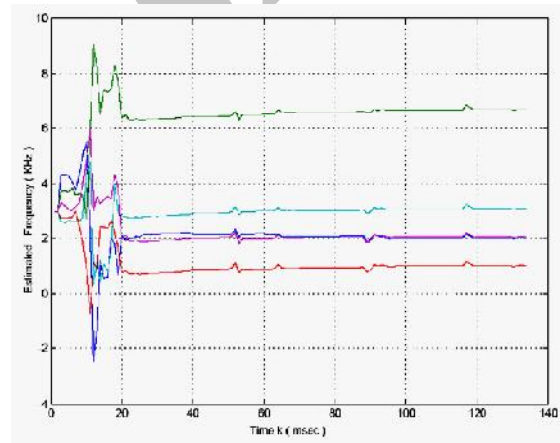
شکل ۵: نمودار فرکانس تکرار پالس تخمین زده شده با روش پیشنهادی برای رادارهای با مشخصات جدول ۴

جدول ۲: فاز و فرکانس تکرار پالس رادارهای محیط (حالت ۱)

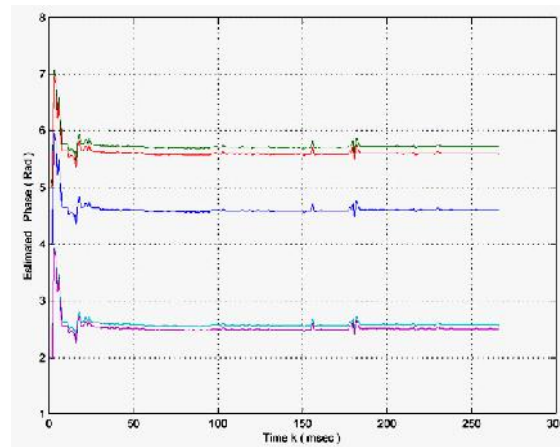
ردیف	مقدار واقعی فرکانس تکرار پالس (KHz)	مقدار واقعی فاز (Rad)
۱	۱/۳۲۳۸	۴/۴۹۵۸
۲	۱/۷۳۶۴	۵/۳۰۹۸
۳	۲/۰۸۳۰	۴/۹۰۲۷
۴	۲/۷۵۹۶	۲/۰۳۸۳
۵	۷/۲۲۴۴	۲/۳۲۶۳

نمودارهای تخمین فاز و فرکانس تکرار پالس به دست آمده از روش پیشنهادی برای رادارهایی با مشخصات جدول ۲ در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.

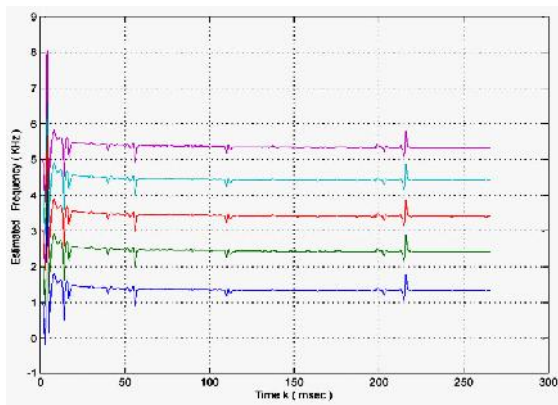
جدول ۳ متوسط مقادیر حاصل از تخمین فرکانس تکرار پالس و فاز نمودار شکل‌های ۳ و ۴ را نشان می‌دهد.



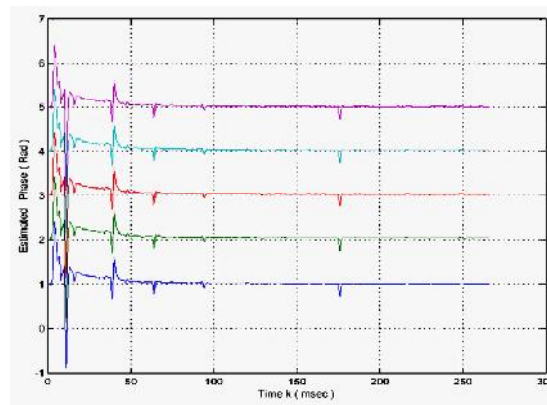
شکل ۳: نمودار فرکانس تکرار پالس تخمین زده شده با روش پیشنهادی برای رادارهای جدول ۲



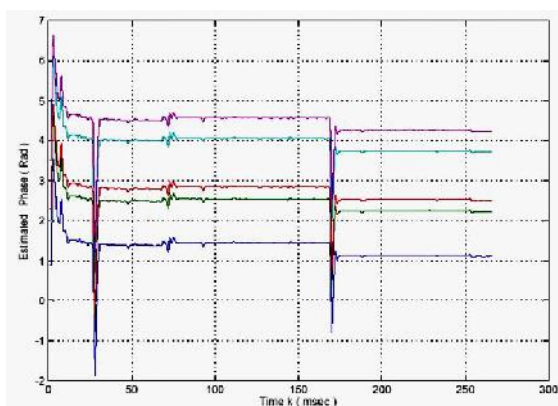
شکل ۴: نمودار فازهای تخمین زده شده با روش پیشنهادی برای رادارهای جدول ۲



شکل ۷: فرکانس تکرار پالس تخمین زده شده با روش پیشنهادی برای رادارهای جدول ۶



شکل ۶: نمودار فاز تخمین زده شده با روش پیشنهادی برای رادارهای جدول ۴



شکل ۸: نمودار فازهای تخمین زده شده با روش پیشنهادی برای رادارهای جدول ۶

جدول ۷ متوسط مقادیر حاصل از تخمین فرکانس تکرار پالس و فاز نمودار شکل های ۷ و ۸ را نشان می دهد. با مقایسه مقدار تخمین زده شده در این جدول با مقادیر واقعی جدول ۶، دقت تخمین و به دنبال آن دقت شناسایی مشخص می شود.

جدول ۷: متوسط مقادیر تخمین زده شده فاز و فرکانس تکرار پالس با روش پیشنهادی برای رادارهای جدول ۶

ردیف	مقدار تخمین زده شده فرکانس تکرار پالس (KHz)	مقدار تخمین زده شده فاز (Rad)
۱	۱/۴۴۵۳	۱/۱۱۷۱
۲	۲/۶۱۱۳	۲/۲۲۱۰
۳	۳/۳۷۸۷	۲/۵۰۵۳
۴	۴/۴۸۰۱	۳/۷۱۰۳
۵	۵/۴۱۸۶	۴/۲۲۶۳

حالت ۴: در این حالت نیز رشته پالس های متداخل پنج رادار با مشخصات جدول ۸ با سیمولاتور پالس های راداری [۱۳] با ۵٪ پالس گمشده و ۵٪ نویز تهیه شده و با الگوریتم پیشنهادی مورد شناسایی واقع شده اند.

جدول ۵: متوسط مقادیر تخمین زده شده فاز و فرکانس تکرار پالس با روش پیشنهادی برای رادارهای جدول ۴

ردیف	مقدار تخمین زده شده فرکانس تکرار پالس (KHz)	مقدار تخمین زده شده فاز (Rad)
۱	۵/۲۸۸۲	۵/۳۲۶۳
۲	۱/۸۳۳۵	۱/۴۹۵۸
۳	۲/۳۶۰۷	۳/۹۰۲۷
۴	۲/۹۶۷۷	۴/۰۳۸۳
۵	۴/۷۲۰۳	۲/۹۶۷۷

جدول ۵ متوسط مقادیر حاصل از تخمین فرکانس تکرار پالس و فاز نمودار شکل های ۵ و ۶ را نشان می دهد.

حالت ۳: در این حالت نیز رشته پالس های متداخل پنج رادار با مشخصات جدول ۶ با سیمولاتور پالس های راداری با ۵٪ پالس گمشده و ۵٪ نویز تهیه شده و با الگوریتم پیشنهادی مورد شناسایی واقع شده اند [۱۳].

جدول ۶: فرکانس تکرار پالس و فاز رادارهای محیط (حالت ۳)

ردیف	مقدار واقعی فرکانس تکرار پالس (KHz)	مقدار واقعی فاز (Rad)
۱	۱/۱۰۰۰	۱/۵۷۰۰
۲	۲/۷۰۰۰	۲/۲۹۰۰
۳	۳/۱۰۰۰	۲/۹۰۰۰
۴	۴/۹۰۰۰	۳/۵۵۰۰
۵	۵/۵۰۰۰	۴/۲۶۰۰

نمودارهای تخمین فاز و فرکانس تکرار پالس به دست آمده از روش پیشنهادی برای رادارهای با مشخصات جدول ۶، در شکل های ۷ و ۸ نشان داده شده است.

جدول ۹: متوسط مقادیر تخمین زده شده فاز و فرکانس تکرار پالس با روش پیشنهادی برای رادارهای جدول ۸

ردیف	مقدار تخمین زده شده فرکانس تکرار پالس (KHz)	مقدار تخمین زده شده فاز (Rad)
۱	۱۰/۲۶۴	۸/۲۷۶۰
۲	۹/۶۵۲۵	۱۰/۲۴۲
۳	۸/۲۰۵۷	۸/۵۶۸۷
۴	۷/۳۸۳۴	۷/۳۶۳۵

۴. نتیجه گیری

الگوریتم‌های ارائه شده قبلی، برای جداسازی رشته پالس‌های متداخل راداری با وجود پنج درصد پالس گمشده و پنج درصد نویز، حداکثر دقتی معادل ۹۳٪ به دست خواهند داد. این الگوریتم‌ها برای جداسازی رشته پالس متداخلی با N پالس، حجم عملیاتی معادل $3N^2$ خواهند داشت. الگوریتم پیشنهادی قادر به تخمین فرکانس تکرار پالس و فاز رشته پالس سناریوهای مختلف است. نتایج شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی برای ۱۰۰ سناریو راداری نشان داد این الگوریتم دقتی معادل ۹۷٪ دارد. در ضمن این الگوریتم دارای حجم محاسباتی معادل $3.23N^2$ است که به دلیل داشتن معادله بازگشتی، می‌توان آن را با سیستم‌های پردازش موازی (آرایه‌های سیستولیکی) پیاده‌سازی کرد.

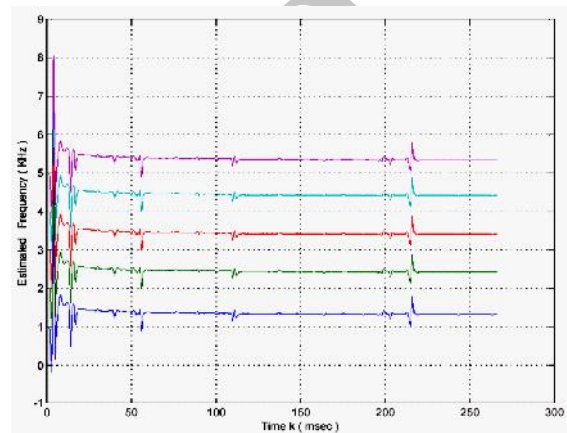
۵. مراجع

- [1] A. AKSOY, "A Multicase Comparative Assessment of the Ensemble Kalman Filter for Assimilation of Radar Observations, ITCJ con"; pp. 253-263, 2010.
- [2] A. Aksoy, D. C. Dowell and C. Snyder, "A Multicase comparative Assessment of the Ensemble Kalman Filter For Assimilation of Radar Observations"; Part I: Storm-Scale Analyses. Mon. Wea. Rev. Vol. 137, pp 1805-1824, 2009
- [3] H. S. Shahhoseini, A. Naseri, M. Naderi, "Matrix Multistage Clustering of Interleaved Pulse Train"; IASTED Int. Conf. Signal Proc. Pattern Recognition and Application, Greece, pp. 98-101, 2002.
- [4] H. S. Shahhoseini, A. Naseri, M. Naderi, "A New Matrix Method for Pulse Train Identification"; IEEE proc. MELECON, pp. 183-187, 2002.
- [5] T. Conroy, J. B. Moore, "On The Estimation of Interleaved Pulse Train Phases", fifth international symposium on signal processing and its applications, ISSPA 99, Brisbane, Australia, pp. 223-226, 22-25, 1999.
- [6] A. Logothetis, V. Krishnamurthy, "An Interval-Amplitude Algorithm For Deinterleaving Stochastic Pulse Train Sources"; IEEE transactions on signal processing, vol. 46, No. 5, pp. 1344-1350, 1998.
- [7] R. J. Orsi, J. B. Moore, R. E. Mahony, "Interleaved Pulse Train Spectrum Estimation"; International Symposium on Signal Processing and Its Applications, ISSPA, Gold Coast, Australia, pp. 125-128, 25-30, 1996.

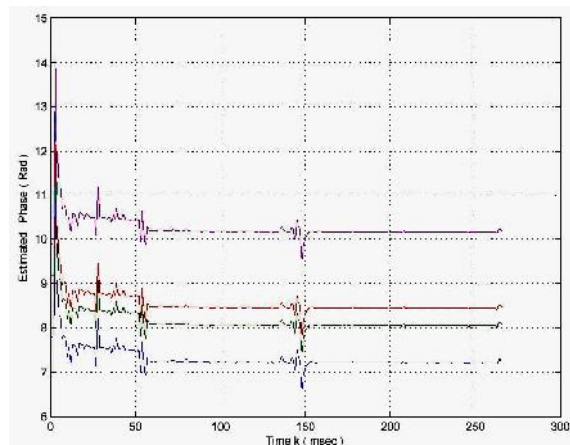
جدول ۸: فرکانس تکرار پالس و فاز رادارهای محیط (حالت ۴)

ردیف	مقدار واقعی فرکانس تکرار پالس (KHz)	مقدار واقعی فاز (Rad)
۱	۱۰/۲۰۰	۸/۰۰۰۰
۲	۹/۸۰۰۰	۱۰/۷۰۰
۳	۸/۳۰۰۰	۸/۵۰۰۰
۴	۷/۸۰۰۰	۷/۹۰۰۰

نمودارهای تخمین فاز و فرکانس تکرار پالس به دست آمده از روش پیشنهادی برای رادارهای جدول ۸ در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۹: نمودار فرکانس تکرار پالس تخمین زده شده با روش پیشنهادی برای رادارهای جدول ۸



شکل ۱۰: نمودار فازهای تخمین زده شده با روش پیشنهادی برای رادارهای جدول ۸

جدول ۹ نیز متوسط مقادیر حاصل از تخمین فرکانس تکرار پالس و فاز نمودار شکل‌های ۹ و ۱۰ را نشان می‌دهد. با مقایسه مقدار تخمین زده شده در این جدول با مقادیر واقعی جدول ۸، دقت تخمین و به دنبال آن دقت شناسایی مشخص می‌شود.

- [11] D. J. Milojevic, B. M. Popovic, "Improved Algorithm for the Deinterleaving of Radar Pulses"; IEEE proc. F, vol. 1, pp. 98-104, 1992.
- [12] H. K. Mardia, "New Techniques For The Deinterleaving of Repetitive Sequences"; IEE proceedings F, Vol. 136 pt. F, No.4, pp. 149-154, 1989.
- [13] A. Nasser, H. S. ShahHosseini, M. Naderi, "Nested Radar Pulses Simulator"; Collection Articles Conf. Electronic and Police Tech., 2004 (In Persia).
- [8] B. M. Sadler, S. D. Casey, "PRI Analysis From Sparse Data via a Modified Euclidean Algorithm"; IEEE proc.of ASILOMAR - 29, pp. 1147-1151, 1996.
- [9] J. Perkins, I. Coat, "Pulse Train Deinterleaving via The Hough Transform"; IEEE Int. conf. on signal proc. vol.3, pp. 197-200, 1994.
- [10] J. B. Moore, V. Krishnamurthy, "Deinterleaving Pulse Trains Using Discrete - Time Stochastic Dynamic Linear Models"; IEEE transaction on signal proc. vol. 42, No. 11, pp. 3092-3103, 1994.

Archive of SID