دانشگاه صنعتی سهند

نشریه سامانه‌های غیرخطی در مهندسی برق

دوره ۵ - شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۳۹۷

صفحات ۲۳ الی ۴۱

ISSN: 2322-3146

http: //jnsee.sut.ac.ir

آشکارسازی اهداف در رادار غیرفعال دوپایه با استفاده از پردازش وفقی مبتنی بر تابع هزینه کارنتروپی

سیدوهاب شجاع‌الدینی[۱] و علیرضا گل‌دار[۲]

[۱] **نویسنده مسئول**، دانشیار، پژوهشکده برق و فناوری اطلاعات، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران shojadini@irost.ir

[۲] پژوهشکده برق و فناوری اطلاعات، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران، a.goldar@irost.ir

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۱۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۱۲)

چکیده

در این مقاله روشی جدید برای آشکارسازی اهداف در رادارهای غیرفعال دوپایه معرفی می‌گردد که از مفهوم کارنتروپی به منظور تفکیک اهداف صحیح و کاذب آشکار شده استفاده می‌نماید. در این روش ابتدا سابقه زمانی هر یک از سلول‌های تابع ابهام به صورت یک فرآیند تصادفی مدل می‌شود. سپس با تشکیل یک فیلتر وفقی با پاسخ ضربه محدود، فرآیندهای تصادفی شامل نویز از فرآیندهای تصادفی شامل اهداف جداسازی می‌شوند. برای بروزرسانی فیلتر مزبور از تابع هزینه مبتنی بر کارنتروپی استفاده می‌شود. کارایی روش پیشنهادی، با استفاده از شبیه‌سازی در حضور اهداف متحرک سریع و کند ارزیابی می‌شود. نتایج حاصله حاکی از برتری روش پیشنهادی نسبت به رقبایش هستند به گونه ای که این روش، اهداف سریع را به ترتیب ۱۸/۷ و ۲۰/۱ درصد بهتر از روش آشکارسازی اهداف با استفاده از آمارگان مرتبه بالا و روش آشکارسازی مبتنی بر مدلسازی کلاتر با تابع توزیع آشکار می‌نماید. همچنین روش پیشنهادی، اهداف کند را نیز به ترتیب ۱۹/۳ و ۲۱/۴ درصد بهتر از همین رقبا آشکارسازی می‌کند که تمام این نتایج در شرایط بیشینه نویز (نسبت سیگنال به کلاتر و نویز برابر با ۳۰- دسیبل) به دست می‌آیند.

واژه‌های کلیدی

رادار غیرفعال دوپایه، تابع ابهام، فیلتر با پاسخ ضربه محدود، تداخل، پردازش وفقی، کارنتروپی.

[Downloaded from jnsee.sut.ac.ir on 2024-04-24]

[DOR: 20.1001.1.23223146.1397.5.2.1.1]

Sahand University of Technology

Journal of Nonlinear Systems in Electrical Engineering

Vol.5, No.2,

Autumn and Winter 2018

ISSN: 2322 – 3146

http://jnsee.sut.ac.ir

Target Detection in Bistatic Passive Radars Using Adaptive Processing Based on Correntropy Cost Function

Seyed Vahab Shojaedini[1] and Alireza Goldar[2]

[1]**Corresponding Author**, Associate Prof, Department of Electrical Engineering and Information Technology, Iranian Research Organization for Science and Technology, Tehran, Iran

[2]Department of Electrical Engineering and Information Technology, Iranian Research Organization for Science and Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

In this paper, a novel method is introduced for target detection in bistatic passive radars which uses the concept of correntropy to distinguish correct targets from false detections. In the proposed method, the history of each cell of ambiguity function is modeled as a stochastic process. Then, the stochastic processes that consist the noise are differentiated from those consisting targets by constructing an FIR adaptive filter. A cost function which is based on correntropy is utilized to update the filter. The performance of the proposed method is evaluated by simulation in presence of rapid and slow moving targets. The obtained results shows the superiority of the proposed method compared to its alternatives in such manner that it detects rapid targets at least 18.7 and 20.1 percent better than HOSCM and PFCM. Furthermore, it detects slow targets 19.3 and 21.4 percent better than those alternatives, all in presence of maximum noise (i.e., SCNR=-30dB).

Keywords

Bistatic passive Radar,

Ambiguity Function,

Finite Impulse Response Filter,

Interference,

Adaptive Processing,

Correntropy.

[Downloaded from jnsee.sut.ac.ir on 20 -24]

[DOR: 20.1001.1.23223146.1397.5.2.1.1]

۱- مقدمه

سیستم‌های PBR[1] رادارهای دوپایه‌ای هستند که به دلیل نداشتن فرستنده اختصاصی، رادارهایی کم‌هزینه و غیرقابل شناسایی هستند و برای ارسال سیگنال از فرستنده‌های موجود در محیط بهره می‌گیرند. در این نوع خاص از رادار هیچ‌گونه موج الکترومغناطیسی تابیده نمی‌شود و به همین دلیل یک رادار پنهان‌کار بوده و به سختی تحت تاثیر جنگ الکترونیک قرار می‌گیرند [۱]. یکی دیگر از مزیت‌های این نوع رادار این است که نیازی به اشغال طیف خاصی از فرکانس ندارد. در واقع در این سیستم راداری، از سیگنال‌های موجود در محیط، نظیر سیگنال‌های تلویزیون آنالوگ TV[2] [۲, ۳]، رادیوهای FM[3] [۴]، DVB- T[4] [۵]، DAB[5] [۶]، GSM[6] [۷] و ماهواره [۸] استفاده می‌شود. از آنجایی که این سیگنال‌ها برای اهداف راداری طراحی نشده‌اند، لزوماً دارای تابع ابهام[7] مناسبی نیستند. در حالت کلی انتخاب یک سیگنال مناسب، به پارامترهایی مثل ناحیه تحت پوشش فرستنده، توان، باند فرکانسی، پهنای باند سیگنال و شکل تابع ابهام آن بستگی دارد. به طوری که از این میان، قدرت تفکیک در برد توسط پهنای باند سیگنال تعیین شده، و قدرت آشکارسازی اهداف، به شکل تابع ابهام آن سیگنال‌ها بستگی دارد. گرچه اغلب سیگنال‌های دیجیتال دارای تابع ابهام مناسب‌تری نسبت به سیگنال‌های آنالوگ هستند، ولی توان کمتر فرستنده‌های این سیگنال‌ها، تنها بردهای کوتاه را قابل دسترس می‌سازند. در این راستا، سیگنال‌های رادیوی FM تجاری، یکی از سیگنال‌های مناسب هستند که علاوه بر دستیابی به عملکرد مناسب در آن‌ها هزینه‌های ساخت آن‌ها نیز معقول است [۹]. سیستم‌های راداری پسیوی که بر این اساس کار می‌کنند را با نام‌های مختلف می‌شناسند که از آن جمله می‌توان به PBR و PCL[8] اشاره نمود. امروزه به دلیل پیشرفت‌های قابل توجه در پردازنده‌های دیجیتال، این سیستم‌ها دوباره مورد توجه قرار گرفته‌اند [۹-۱۱]. تداخل‌های کلی در رادار غیرفعال شامل تداخل مسیر مستقیم (DPI[9])، سیگنال‌های کلاتر و یا سیگنال‌های ناشی از چندمسیرگی هستند که ناشی از بازتاب اهداف قوی‌تر هستند. سیگنال‌های DPI و کلاتر دارای شیفت داپلر قابل توجهی نیستند، بنابراین در پردازش فیلتر منطبق، در اطراف محور داپلر صفر واقع می‌شوند. اما آن‌ها دارای توان بالایی هستند که گلبرگ‌های فرعی آن‌ها بازتاب ناشی از اهداف کوچکتر را می‌پوشانند. بنابراین حذف کلاتر و DPI قبل از پردازش در رادار غیرفعال بسیار ضروری است. در برخی از مراجع از بلوک‌های LS[10] و فیلتر تطبیقی مانند NLMS[11]، VS LMS[12]، LMS- Lattice و RLS[13] برای حذف کلاتر و DPI در رادارهای غیرفعال استفاده شده است. تداخل نوع دوم حاصل از اهداف قوی‌تر است که انعکاس ناشی از اهداف ضعیف‌تر را می‌پوشاند. برخی از مراجع به این نوع خاص از تداخل توجهی نکرده‌اند و از الگوریتم CA-CFAR[14] یا نرخ ثابت هشدار غلط توسط میانگین‌گیری در سلول نظیر آنچه که در رادارهای فعال استفاده می‌شود، استفاده کرده‌اند. برخی دیگر از مراجع این تداخل را مورد توجه قرار داده‌اند و آشکارسازی هدف را به صورت چند مرحله‌ای انجام داده‌اند [۹]. از روش‌های دیگر ارائه شده در این زمینه می‌توان به ارائه یک مدل برای سابقه زمانی هر سلول از تابع ابهام و به دست آوردن آستانه مربوط به آن سلول اشاره کرد که به کمک آن می‌توان اهداف واقعی را از میان قله‌های موجود در تابع ابهام مشخص کرد [۱۲-۱۹]. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش تخمین مدل کلاتر و نویز به کمک

[1] Passive Bistatic Radar
[2] Television
[3] Frequency Modulation
[4] Digital Video Broadcast- Terrestrial
[5] Digital Audio Broadcast
[6] Global System for Mobile communication
[7] Ambiguity Function
[8] Passive Coherent Location
[9] Direct Path Interference
[10] Least Square
[11] Normalized Least Mean Square
[12] Variable Step- Size LMS
[13] Recursive Least Square
[14] Cell- Averaging Constant False Alarm Rate

[Downloaded from jnsee.sut.ac.ir on 2024-04-24]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1397.5.2.1.1]

شبکه عصبی اشاره کرد [۱۲]. همچنین روش‌های تخمین یک مدل برای کلاتر و نویز به کمک آمارگان مرتبه بالا [۱۱] و ارائه مدل‌های آماری [۱۳] نیز از همین دسته هستند. در سالهای اخیر مفهوم زنجیره مارکوف نیز در انجام این تخمین مورد استفاده قرار گرفته است [۱۵-۱۴]. تخمین‌گرهای مبتنی بر بیشینه شباهت[1] نیز در برخی تحقیقات مورد استفاده قرارگرفته‌اند [۱۶]. مفهوم همبستگی نیز در قالب تخمین‌گرهای مبتنی بر همبستگی متقاطع و یا نسخه‌های بهبودیافته آن مانند بیشینه‌سازی امید ریاضی نیز در پاره‌ای از پژوهش‌ها بدین منظور مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۷].

در این مقاله یک روش جدید برای شناسایی اهداف واقعی از میان قله‌های موجود در سلول‌های تابع ابهام، در شرایط نویزی و کلاتر بالا ارائه می‌شود. در این روش یک سابقه زمانی از هر سلول تابع ابهام به عنوان یک سیگنال تصادفی در نظر گرفته می‌شود. سپس تلاش می‌شود که تعلق هر سلول از تابع ابهام جدید، به سابقه زمانی متناظر خود در قالب مسئله آزمون فرض‌های تصادفی بیان گردد. بر این اساس سابقه زمانی هر سلول را در دو بازه زمانی متفاوت بررسی می‌کنیم. سیگنال اول شامل سابقه زمانی هر سلول تا آخرین لحظه ثبت شده است. به‌طوری‌که وجود و یا عدم وجود هدف در این سیگنال مشخص شده است. سیگنال دوم شامل سابقه زمانی همان سلول تا فریم جاری است که هنوز وضعیت وجود و یا عدم وجود هدف در آن مشخص نشده است. سپس از یک روش وفقی بر پایه فیلتر با پاسخ ضربه محدود برای مدلسازی این دو سیگنال برحسب هم استفاده می‌شود. خطای این مدل‌سازی با معیار کارنتروپی به عنوان تابع هزینه برای تطبیق وفقی وزن‌های فیلتر مزبور محاسبه می‌شود. با استفاده از خطای مدلسازی مزبور می‌توان وجود یا عدم وجود هدف را در فریم جاری مشخص نمود. استفاده از مدلسازی هر سلول تابع ابهام در قالب سیگنال تصادفی، استفاده از شیوه وفقی بر پایه فیلتر با پاسخ ضربه محدود برای مدلسازی و نهایتاً استفاده از تابع کارنتروپی به عنوان تابع هزینه در این پژوهش موجب بهبود نتایج نسبت به روش‌های موجود می‌شوند. بدین ترتیب با مشخص نمودن فرض صحیح، تعلق هر سلول از تابع ابهام به هدف یا نویز و کلاتر مشخص می‌گردد.

ساختار کلی این مقاله به صورت زیر است. در بخش ۲ الگوریتم پیشنهادی و همچنین نحوه تشکیل سیگنال تصادفی مورد نظر در این مقاله برای هر سلول تابع ابهام ارائه می‌شود. در بخش ۳ عملکرد روش پیشنهادی به وسیله شبیه‌سازی چند هدف در شرایط مختلف نویز و کلاتر و همچنین در دو سناریوی مختلف با اهداف کند و سریع بررسی می‌شود و سپس نتایج حاصل از این روش با دو روش موجود دیگر در شرایط مختلف مقایسه می‌شوند. بخش پایانی مقاله نیز به نتیجه‌گیری اختصاص دارد.

۲- الگوریتم پیشنهادی

یک دنباله زمانی I از توابع ابهام را در نظر بگیرید که I_t تابع ابهام مربوط به این دنباله در فریم tام است. برای هر سلول تأخیر-داپلر از I_t که برای اختصار سلول نامیده شده‌اند، رابطه زیر برقرار است:

$$I_{tmj} = I_t(m,j) \qquad 1 \le m \le M \;\;,\;\; 1 \le j \le J \;\;,\;\; 0 \le t \le T \tag{۱}$$

در رابطه (۱) I_{tmj} دامنه سلولی از I_t است که به ترتیب در سطر و ستون m و j قرار دارد. m و j ابعاد تابع ابهام و T تعداد فریم‌های آن است. هر فریم شامل ترکیبی از نویز و کلاتر و احتمالاً چند هدف است. سابقه زمانی این سلول را در یک بازه زمانی بین فریم‌های t و $t+k+q$ بصورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$a(l) = \left\{ I_{(t+k)mj} \right\} = \left\{ I_{tmj}, I_{(t+1)mj}, \ldots, I_{(t+k)mj} \right\}$$
$$b(l) = \left\{ I_{(t+q+k)mj} \right\} = \left\{ I_{(t+q)mj}, I_{(t+q+1)mj}, \ldots, I_{(t+q+k)mj} \right\} \tag{۲}$$

[1] Maximum Likelihood Estimator (MLE)

[Downloaded from jnsee.sut.ac.ir on 2024-04-24]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1397.5.2.1.1]

l شمارنده اعضای دو مجموعه a و b بوده که هر دو دارای $k+1$ عضو هستند و لذا $1 \le l \le k+1$ است. با پذیرش فرض $q < k$، واضح است که دنباله‌های بالا شامل $t+k$ عضو مشترک و q عضو متفاوت است. براساس آزمون فرض‌ها وابستگی سلول $I_{(t+q+k)mj}$ به کلاتر و نویز را با H_0 و وابستگی این سلول به هدف را با H_1 تعریف می‌کنیم.

$$\begin{cases} H_0: \ I_{(t+q+k)mj} = \left| c_{(t+q+k)mj} + n_{(t+q+k)mj} \right| \\ H_1: \ I_{(t+q+k)mj} = \left| g_{(t+q+k)mj} + c_{(t+q+k)mj} + n_{(t+q+k)mj} \right| \end{cases} \quad (۳)$$

در رابطه بالا $g_{(t+q+k)mj}$ نشان دهنده هدف، $c_{(t+q+k)mj}$ نشان دهنده کلاتر و اجسامی است که به اشتباه آشکار شده‌اند و سرانجام $n_{(t+q+k)mj}$ نشان دهنده مجموع نویزهای موجود در سلول $I_{(t+q+k)mj}$ است. با در نظر گرفتن $f(l)$ به عنوان بخش مشترک، دنباله‌های بالا به صورت زیر بازنویسی می‌شوند:

$$\begin{aligned} a(l) &= f(l) + d_1(l) \\ b(l) &= f(l - l_0) + d_2(l) \end{aligned} \quad (۴)$$

بر اساس رابطه (۲)، برای $1 \le l \le t+k$، $d_1(l)$ و $d_2(l)$ نمونه‌های متفاوت بین $a(l)$ و $b(l)$ هستند. به منظور سادگی در این دو دنباله، از یک روش وفقی بر پایه فیلتر با پاسخ ضربه محدود (FIR)[1] استفاده می‌کنیم. از این فیلتر برای تخمین $b(l)$ از روی $a(l)$ استفاده می‌شود. اگر بردار وزن‌های این فیلتر را به صورت زیر تعریف کنیم:

$$\alpha = \left[\alpha(-\beta), ..., \alpha(0), ..., \alpha(\beta) \right] \quad (۵)$$

خروجی این فیلتر که همان تخمین $b(l)$ است، به صورت زیر خواهد بود:

$$\hat{b}(l) = \sum_{r=-\beta}^{\beta} \alpha(r) a(l+r) \quad (۶)$$

خطای بین مقدار واقعی و تخمین زده شده برای $b(l)$ بصورت بردار خطای $e = \left[e(1), e(2), ..., e(l), ..., e(t+k) \right]$ تعریف می‌شود که بصورت زیر بدست می‌آید:

$$e(l) = b(l) - \sum_{r=-\beta}^{\beta} \alpha(r) a(l+r) \quad (۷)$$

در رابطه بالا، بهینه‌سازی برای رسیدن به بهترین تخمین برای α منجر به مینیمم شدن بخش خطا می‌شود. در این مقاله، معیار کارنتروپی ماکزیمم به عنوان تابع هزینه برای تطبیق وفقی در وزن‌های فیلتر FIR استفاده شده است.

$$C[x] = E\left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2} \right) \right] \quad (۸)$$

در این رابطه E و σ به ترتیب امید ریاضی و واریانس هستند. با در اختیار داشتن $(t+k)$ جفت از نمونه‌های $a(l)$ و $b(l)$ از رابطه (۲)، کارنتروپی بردار خطا به صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$\hat{C}[e] = \frac{1}{t+k-2\beta} \sum_{l=\beta+1}^{t+k-\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{e^2(l)}{2\sigma^2} \right) \quad (۹)$$

با جایگذاری بخش خطا از رابطه (۷) در رابطه (۹)، رابطه بین تابع هزینه تخمین زده شده و بردار وزن‌های فیلتر FIR به صورت زیر بدست می‌آید:

[1] Finite Impulse Response

[Downloaded from jnsee.sut.ac.ir on 2024-04-24]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1397.5.2.1.1]

$$\hat{C}[\alpha]=\frac{1}{t+k-2\beta}\sum_{l=\beta+1}^{t+k-\beta}\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\times\exp\left(-\frac{b(l)-\sum_{r=-\beta}^{\beta}\alpha(r)a(l+r)}{2\sigma^2}\right) \quad (۱۰)$$

بردار وزن‌های فیلتر FIR با ماکزیمم کردن $\hat{C}[\alpha]$ با استفاده از روش گرادیان تصادفی به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\alpha_{p+1}=\alpha_p+\lambda\left[\frac{\partial\hat{C}[\alpha]}{\partial\alpha}\right]_p= \alpha_p+2\lambda\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left(-\frac{e_p^2}{2\sigma^2}\right)e_p'\frac{1}{2\sigma^2}\bar{a} \quad (۱۱)$$

α_{p+1} و α_p وزن‌های تخمین زده شده برای فیلتر FIR به ترتیب در تکرارهای متوالی p و $p+1$ هستند. همچنین e_p و e_p' بردارهای خطا و ترانهاده آن در تکرار p ام هستند و در نهایت خواهیم داشت: $\bar{a}=\left[a(p-\beta),...,a(p),...,a(p+\beta)\right]$. در ارزیابی نهایی از مقدار بدست آمده برای تابع هزینه (مشابه آنچه در رابطه (۱۲) دیده می‌شود)، مشخص می‌شود که سلول $I_{(t+q+k)mj}$ تنها ترکیبی قوی از نویزها و کلاتر است (H_0) و یا احتمالاً بخشی از یک هدف واقعی است که باید در مرحله بعدی مورد بررسی قرار گیرد.

$$\begin{cases} reject\,(H_1)\equiv H_0 : Max\left[\hat{C}[\alpha]\right]\geq\gamma\Rightarrow \\ \quad I_{(t+q+k)mj}=\left|f_{(t+q+k)mj}+n_{(t+q+k)mj}\right| \\ \\ Do\ not\ reject\,(H_1):\quad Otherwise \end{cases} \quad (۱۲)$$

در پایان مرحله اول، تعدادی از سلول‌ها که موفق به عبور از معیار کارنتروپی می‌شوند، به عنوان کاندیدای وجود هدف در آن نقاط مشخص می‌شوند. حال در مرحله دوم می خواهیم اهداف واقعی را از بین این کاندیدها مشخص کنیم. برای این منظور دو مقدار آستانه مختلف را برای دو همسایگی ۳×۳ و ۵×۵ به ترتیب برای یک فریم قبل و دو فریم قبل از فریم شامل سلول کاندید در اطراف آن اعمال می‌کنیم. سلول کاندیدی که از هر دو مرحله عبور کند به عنوان بخشی از یک هدف واقعی مشخص می‌شود. شبه‌کد مربوط به هر دو مرحله‌ی انتخاب کاندید و انتخاب هدف واقعی از بین این کاندیدها، در شکل (۱) نشان داده شده است.

۳- شبیه‌سازی

تمام شبیه‌سازی‌های این مقاله در نرم‌افزار Matlab2014 انجام شده‌اند. به منظور ارزیابی کارایی روش پیشنهادی، شبیه‌سازی‌ها برای دو سناریوی مختلف انجام می‌شوند.

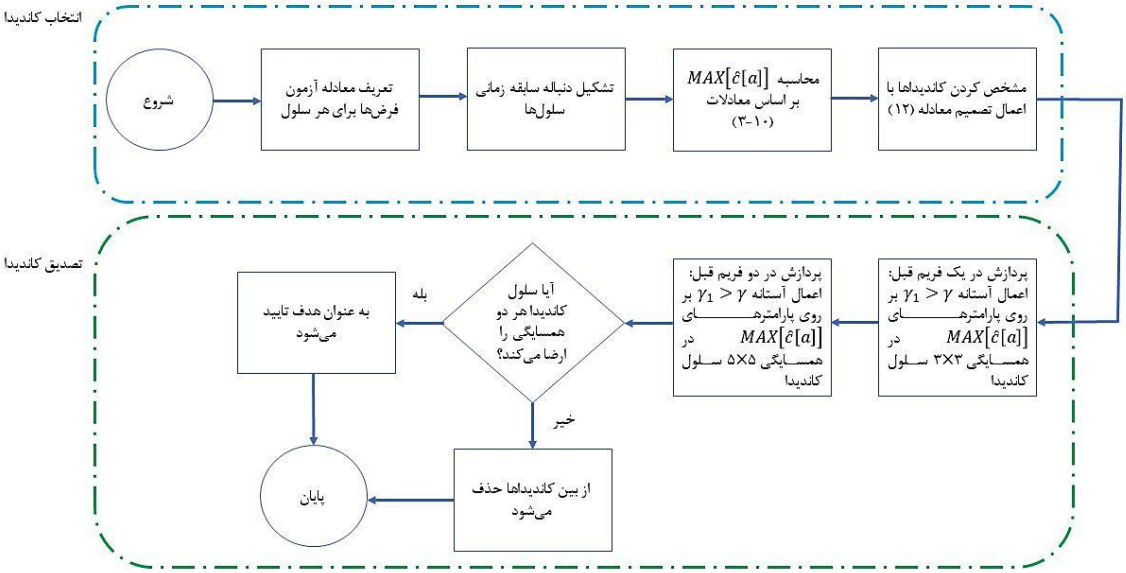
سناریوی اول: اهداف سریع

در این سناریو تعداد ۶ هدف با سرعت بالا و با پارامترهای متفاوت شبیه‌سازی شده‌اند که مشخصات این اهداف در جدول (۱) بیان شده است. منحنی حرکت اهداف در بازه زمانی مشخصی شبیه‌سازی شده و متناظر با آن توابع ابهام فریم‌های مختلف تولید و ذخیره‌سازی شدند. تعداد اهداف فعال در صحنه همواره تغییر می‌کنند که منحنی این تغییرات در شکل (۲) نشان داده شده است.

به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی، آن را بر روی ۵۰ فریم متوالی شامل هر ۶ هدف (۴۵۰ تا ۵۰۰) اعمال کردیم. نتایج حاصل از آشکارسازی در فریم ۴۷۵ را در ادامه نشان می‌دهیم. مشخصات اهداف شبیه‌سازی شده برای این سناریو در فریم ۴۷۵ در جدول (۲) بیان شده است.

[Downloaded from jnsee.sut.ac.ir on 2024-04-24]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1397.5.2.1.1]

به علاوه، روش‌های آشکارسازی مبتنی بر مدلسازی کلاتر با تابع توزیع (PFCM[1]) [۱۸] و آشکارسازی اهداف با استفاده از آمارگان مرتبه بالا (HOSCM[2]) [۱۲] را نیز به منظور مقایسه نتایج در شرایط مختلف و اثبات کارآمدی الگوریتم پیشنهادی، پیاده‌سازی می‌کنیم.



شکل ۱. روندنمای فرایند آشکارسازی در روش پیشنهادی

جدول ۱. پارامترهای اهداف شبیه‌سازی شده در سناریوی اول

ویژگی	مقدار	ویژگی	مقدار
تعداد کل فریم‌های شبیه‌سازی	۵۷۷۱۹	حداکثر اختلاف بزرگی سلول‌های اهداف مختلف در یک صفحه (بدون اثر نویز)	۳۰٪
میانگین نرخ تغییر تأخیر اهداف بر فریم (نمونه بر فریم)	هدف۱: ۰/۲۸ هدف۲: ۰/۱۵ هدف۳: ۰/۲۴ هدف۴: ۰/۱۱ هدف۵: ۰/۱۹ هدف۶: ۰/۳۱	میانگین نرخ تغییر داپلر اهداف بر فریم (هرتز بر فریم)	هدف۱: ۱/۴۴ هدف۲: ۰/۶۶ هدف۳: ۰/۹۷ هدف۴: ۱/۲۱ هدف۵: ۰/۷۲ هدف۶: ۱/۱۳
محدوده شبیه‌سازی نسبت سیگنال به کلاتر و نویز (دسی‌بل)	۳۰- تا ۲۰-	هاله همسایگی هر هدف در محورهای تأخیر و داپلر (سلول)	تأخیر:۳ ± داپلر:۲ ±

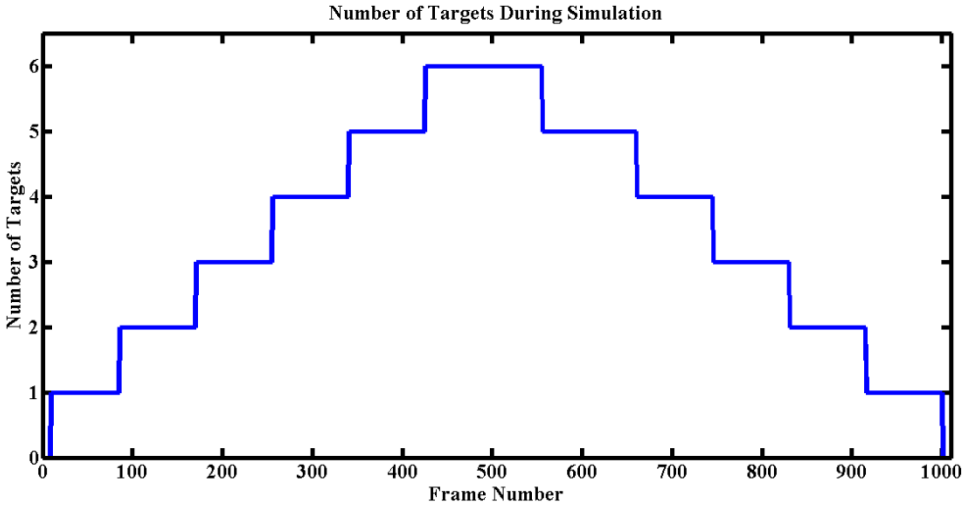
[1] Probability Function Clutter Modelling
[2] Higher Order Statistic Clutter Modelling

[Downloaded from jnsee.sut.ac.ir on 2024-04-24]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1397.5.2.1.1]

جدول ۲. مشخصات اهداف در فریم ۴۷۵ برای سناریوی اول

اهداف	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
فاصله(کیلومتر)	۵	۲۰	۵۰	۷۵	۱۰۰	۱۲۵
فرکانس داپلر (هرتز)	۱۰۴	-۱۱۶	۱۲۴	-۱۴۸	۱۶۶	۱۸۷

سرانجام اهداف آشکار شده در هر فریم با اهداف واقعی شبیه‌سازی شده در آن فریم را با هم مقایسه می‌کنیم و احتمال آشکارسازی و همچنین احتمال نرخ هشدار غلط را برای هر سه روش محاسبه می‌کنیم. نتایج حاصل از آشکارسازی توسط الگوریتم پیشنهادی در سه مقدار مختلف برای نسبت سیگنال به کلاتر و نویز، در جدول (۳) بیان شداند. همچنین تابع ابهام مربوط به آشکارسازی این اهداف در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۲. نمایش تغییر تعداد اهداف در طول شبیه‌سازی

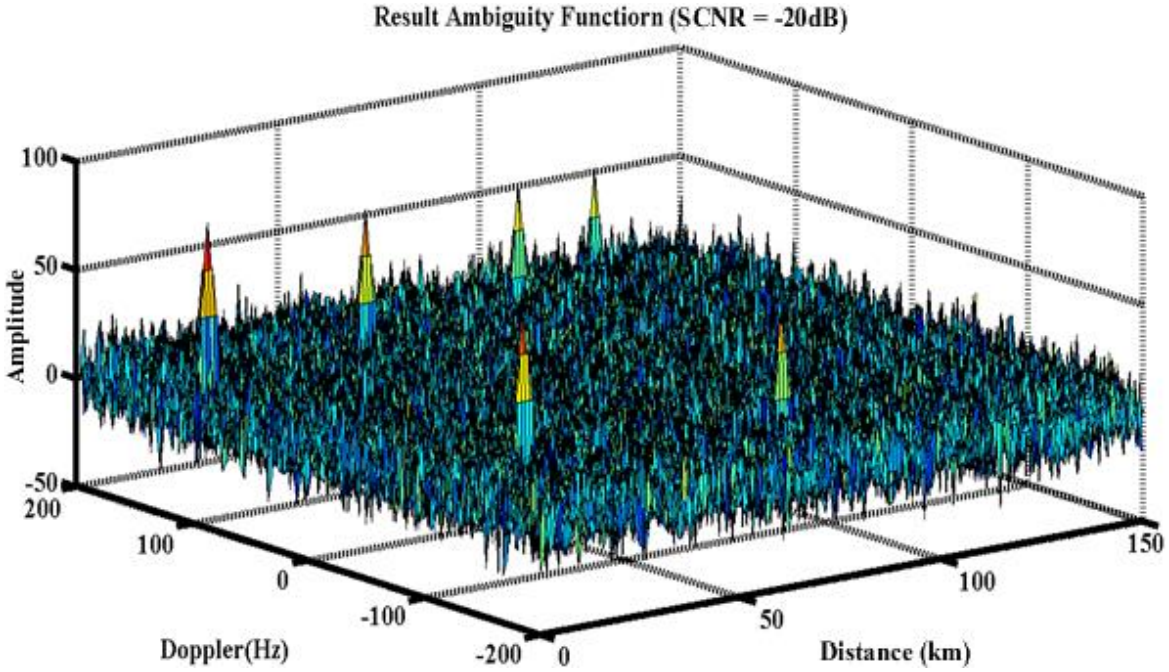
جدول ۳. اهداف آشکار شده در سناریوی اول با الگوریتم پیشنهادی در شرایط نویزی مختلف

اهداف	SCNR = -20 dB		SCNR = -22 dB		SCNR = -24 dB		SCNR = -26 dB		SCNR = -28 dB		SCNR = -30 dB	
	فاصله (کیلومتر)	فرکانس داپلر (هرتز)	فاصله (کیلومتر)	فرکانس داپلر (هرتز)	فاصله (کیلومتر)	فرکانس داپلر (هرتز)	فاصله (کیلومتر)	فرکانس داپلر (هرتز)	فاصله (کیلومتر)	فرکانس داپلر (هرتز)	فاصله (کیلومتر)	فرکانس داپلر (هرتز)
T_1	۵	۱۰۴	۵	۱۰۴	۵	۱۰۴	۵	۱۰۴	۵	۱۰۴	۵	۱۰۴
T_2	۲۰	-۱۱۶	۲۰	-۱۱۶	۲۰	-۱۱۶	۲۰	-۱۱۶	۲۰	-۱۱۶	۲۰	-۱۱۶
T_3	۵۰	۱۲۴	۵۰	۱۲۴	۵۰	۱۲۴	۵۰	۱۲۴	۵۰	۱۲۴	۵۰	۱۲۴
T_4	۷۵	-۱۴۸	۷۵	-۱۴۸	۷۵	-۱۴۸	۷۵	-۱۴۸	۷۵	-۱۴۸	۹۴	-۱۳۳
T_5	۱۰۰	۱۶۶	۱۰۰	۱۶۶	۱۰۰	۱۶۶	۱۱۲	-۶۷	۹۴	-۱۳۳	۱۱۲	-۶۷
T_6	۱۲۵	۱۸۷	--	--	۱۱۲	-۶۷	--	--	۱۱۲	-۶۷	--	--

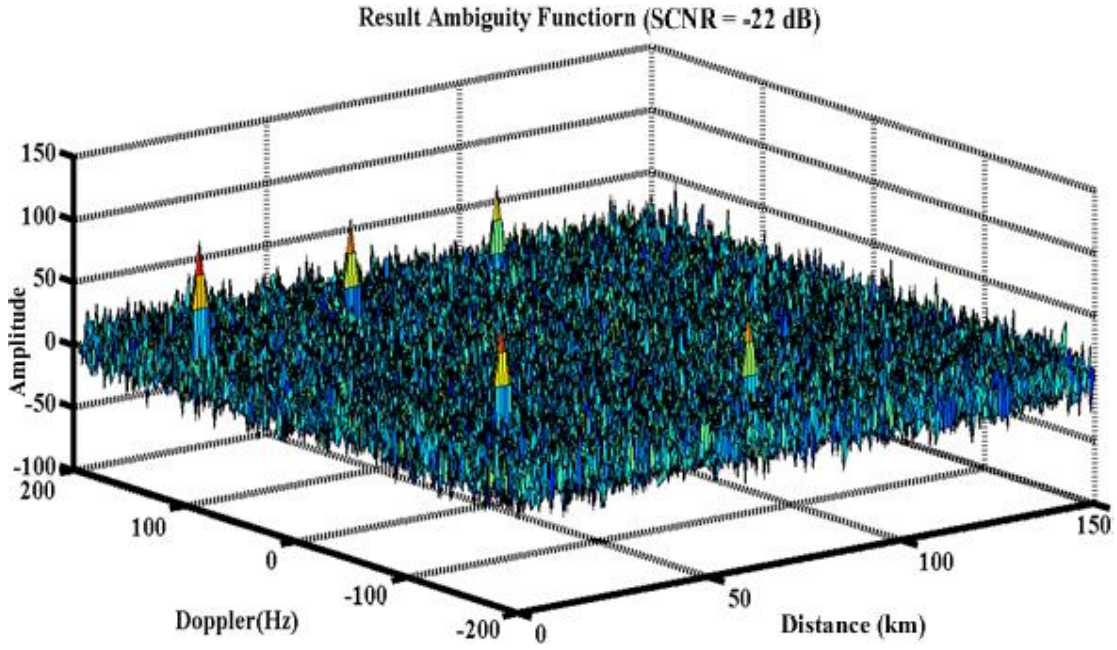
نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی در نسبت سیگنال به کلاتر و نویز ۲۰- دسیبل (شکل ۳- الف) نشان می‌دهد که تمام ۶ هدف به درستی آشکار شده‌اند و همچنین هیچ هدفی به اشتباه آشکار نشده است. به همین ترتیب نتایج برای شرایط SCNR برابر با ۲۲- دسیبل حاکی از آن است که ۵ هدف از ۶ هدف به درستی آشکار شده‌اند و هیچ هدفی به اشتباه آشکار نشده است (شکل ۳-

[Downloaded from jnsee.sut.ac.ir on 2024-04-24]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1397.5.2.1.1]

ب). این ارقام در SCNR برابر با ۲۴- دسیبل به ترتیب ۵ هدف صحیح و یک هدف اشتباه (شکل ۳- پ)، در SCNR برابر ۲۶- دسیبل به ترتیب ۴ هدف صحیح و یک هدف اشتباه (شکل ۳- ت)، در SCNR برابر ۲۸- دسیبل به ترتیب ۴ هدف صحیح و دو هدف اشتباه (شکل ۳- ث) و درنهایت در SCNR برابر ۳۰- دسیبل به ترتیب ۳ هدف صحیح و دو هدف اشتباه می‌باشند (شکل ۳- ج).



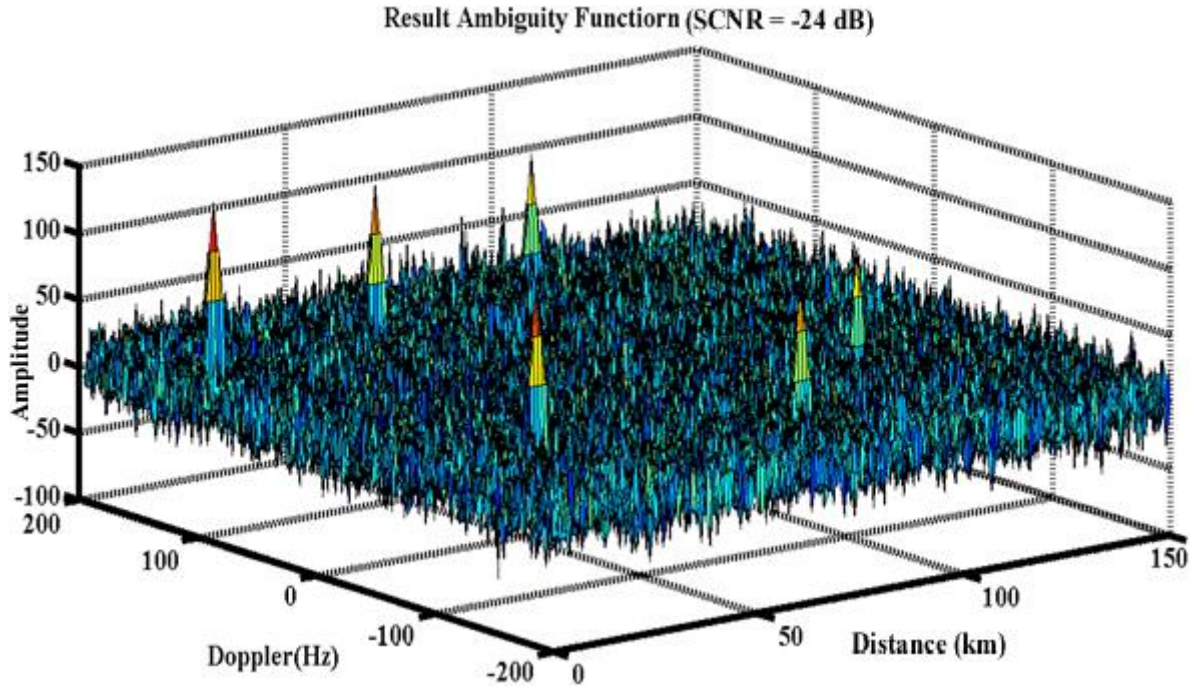
(الف)



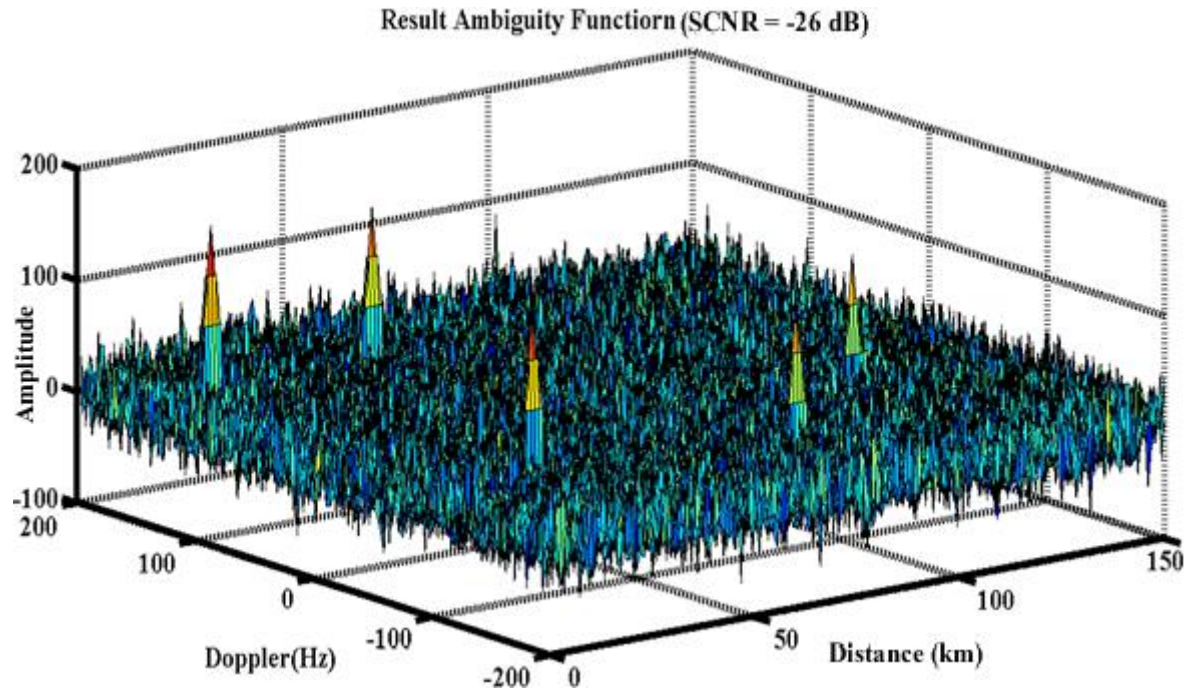
(ب)

[Downloaded from jnsee.sut.ac.ir on 2024-04-24]

[DOR: 20.1001.1.23223146.1397.5.2.1.1]



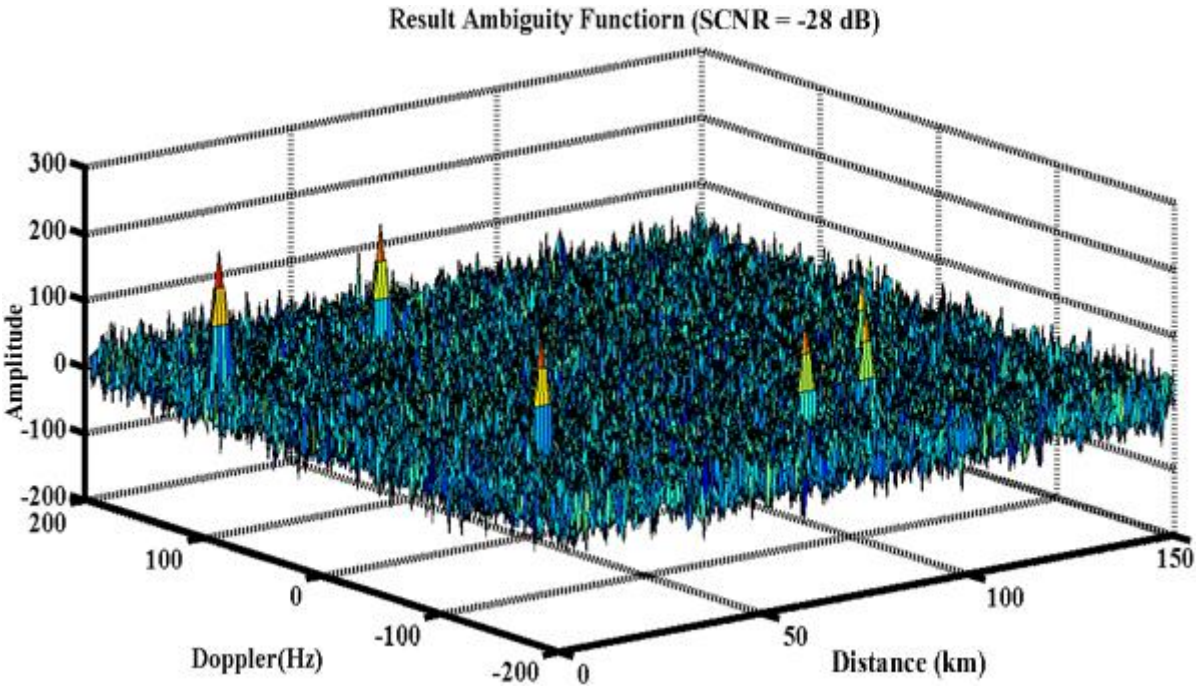
(پ)



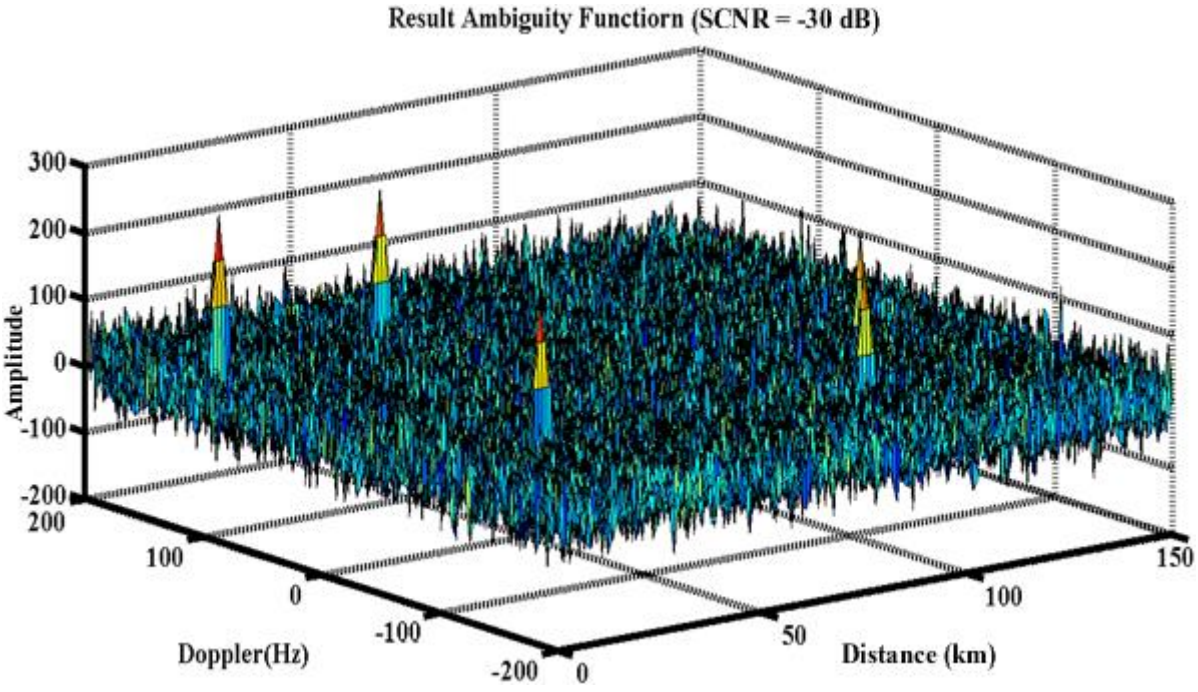
(ت)

[Downloaded from jnsee.sut.ac.ir on 2024-04-24]

[DOR: 20.1001.1.23223146.1397.5.2.1.1]



(ث)



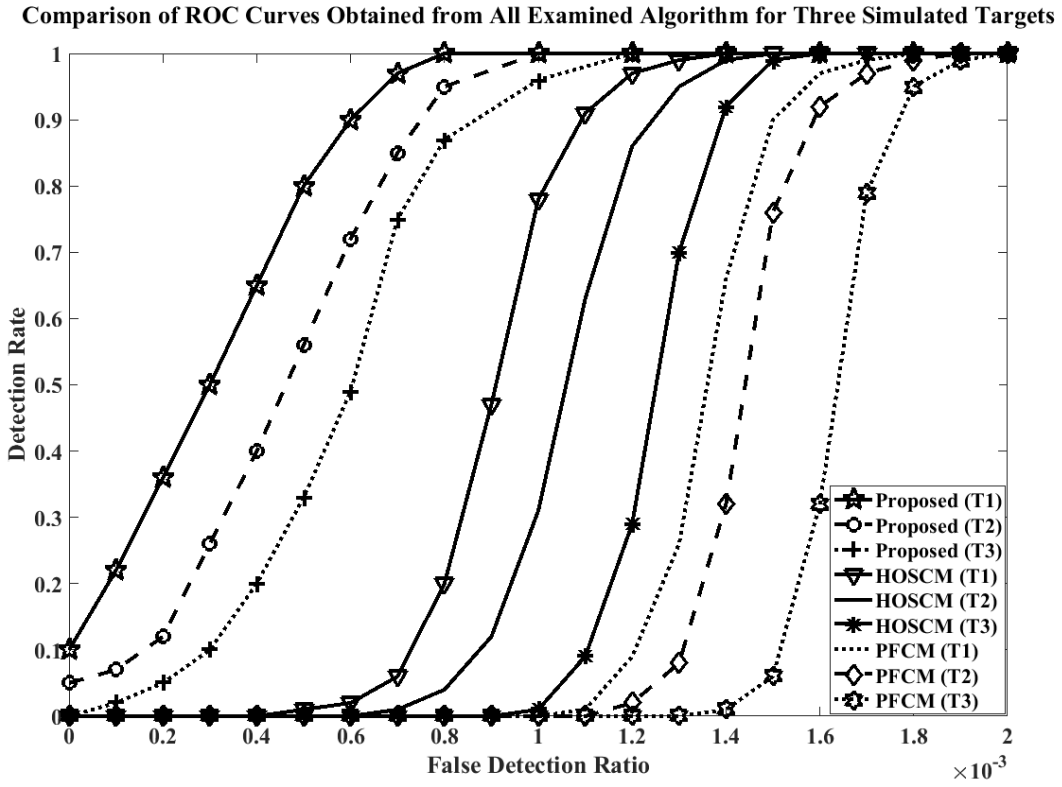
(ج)

شکل۳. اهداف آشکار شده حاصل از اعمال الگوریتم پیشنهادی در سناریوی اول برای شرایط: الف. SCNR = -20 dB، ب. SCNR = -22 dB، پ. SCNR = -24 dB، ت. SCNR = -26 dB، ث. SCNR = -28 dB و ج. SCNR = -30 dB

به منظور بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، شبیه‌سازی‌ها را برای SCNRهای مختلف انجام می‌دهیم و در هر مرحله نتایج بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی با دو الگوریتم رقیب PFCM و HOSCM مقایسه می‌شوند. در هر یک از روش‌ها، مقادیر آشکار شده با مقادیر شبیه‌سازی شده، توسط دو معیار احتمال آشکارسازی P_d و احتمال هشدار غلط P_{fa}، مقایسه می‌شوند. نتایج

[Downloaded from jnsee.sut.ac.ir on 2024-04-24]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1397.5.2.1.1]

بدست آمده نشان می‌دهند که الگوریتم پیشنهادی، در تمام SCNRهای آزموده شده نسبت به الگوریتم‌های رقیب، هم در احتمال آشکارسازی و هم در احتمال هشدار غلط، برتری قابل ملاحظه‌ای دارد. نتایج بدست آمده از این مقایسه‌ها را می‌توانید در شکل (۴) ملاحظه کنید. سه منحنی اول مربوط به نتایج حاصل از اعمال روش پیشنهادی در مورد سه هدف اول است. به همین ترتیب سه منحنی بعدی مربوط به روش HOSCM و سه منحنی آخر مربوط به روش PFCM است. نتایج نشان می‌دهند که این روش‌ها در SCNRهای بالا اختلاف قابل توجهی ندارند. بطور مثال در SCNR برابر با ۲۱- دسیبل، روش پیشنهادی تنها ۳/۲ درصد نسبت به روش HOSCM و ۴/۷ درصد نسبت به روش PFCM برتری دارد. اما در SCNRهای پایین‌تر اوضاع کمی متفاوت است و این برتری محسوس‌تر به نظر می‌رسد. برای مثال در SCNR برابر با ۲۶- دسیبل، روش پیشنهادی ۲۲/۶ درصد نسبت به روش HOSCM و ۲۵/۲ درصد نسبت به روش PFCM برتری دارد.



شکل ۴. درصد آشکارسازی بر حسب احتمال هشدار غلط در سناریوی اول برای روش‌های این مقاله. سه منحنی Proposed(T1)، Proposed(T2) و Proposed(T3) به نتایج حاصل از اعمال روش پیشنهادی در مورد به ترتیب اهداف اول و دوم و سوم دلالت دارند. به همین ترتیب سه منحنی بعدی مربوط به روش HOSCM برای همین سه هدف و سه نمودار آخر مربوط به روش PFCM برای آنها است.

سناریوی دوم: اهداف کند

به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی در حضور اهداف با سرعت کمتر، میانگین تغییرات تأخیر و داپلر اهداف در هر فریم را به ترتیب ۲۰ و ۳۰ درصد کاهش می‌دهیم. به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی، آن را بر روی ۵۰ فریم متوالی شامل هر ۶ هدف (۴۵۰ تا ۵۰۰) اعمال می‌کنیم. نتایج حاصل از آشکارسازی در فریم ۴۷۵ را در ادامه نشان می‌دهیم. مشخصات اهداف شبیه‌سازی شده برای این سناریو در فریم ۴۷۵ در جدول (۴) بیان شده است. مشابه روش بیان شده در سناریوی اول، نتایج حاصل از آشکارسازی توسط الگوریتم پیشنهادی در سه مقدار مختلف برای نسبت سیگنال به کلاتر و نویز، در جدول (۵) بیان شده‌اند.

[Downloaded from jnsee.sut.ac.ir on 2024-04-24]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1397.5.2.1.1]

همچنین تابع ابهام مربوط به آشکارسازی این اهداف در شکل (۵) نشان داده شده است.

جدول ۴. پارامترهای اهداف شبیه‌سازی شده در سناریوی دوم

اهداف	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
فاصله(کیلومتر)	۵	۲۰	۵۰	۷۵	۱۰۰	۱۲۵
فرکانس داپلر (هرتز)	۵۲	-۵۸	۶۲	-۷۴	۸۳	۹۳

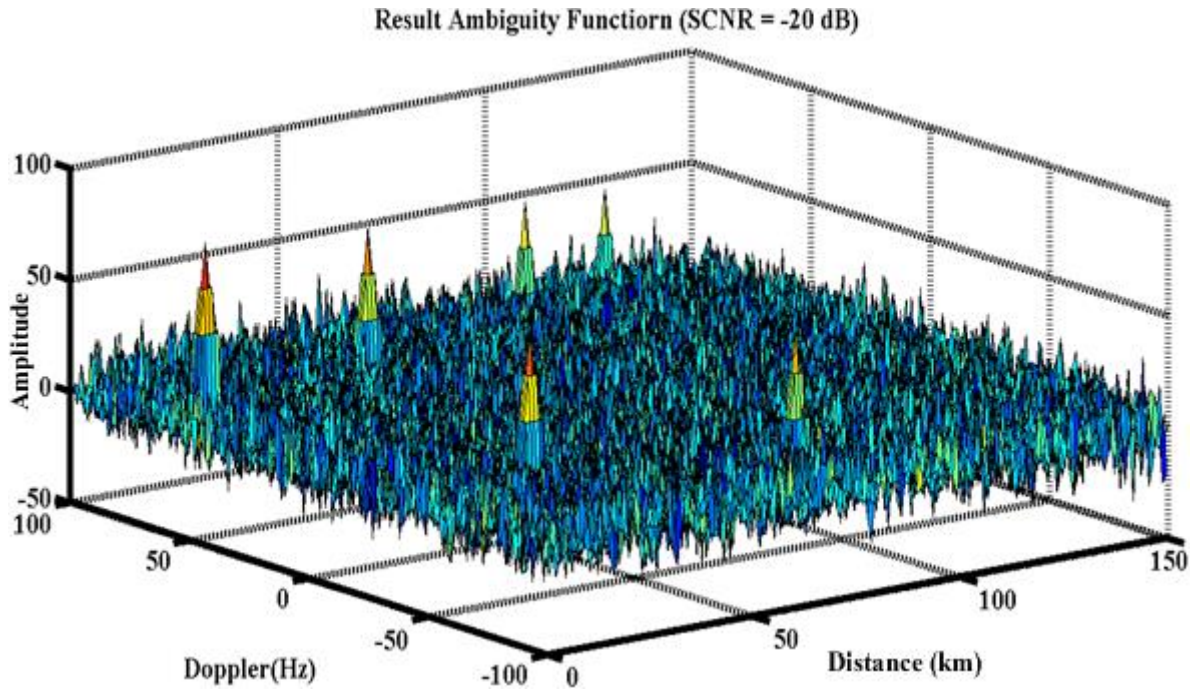
جدول ۵. اهداف آشکار شده در سناریوی دوم با الگوریتم پیشنهادی در شرایط نویزی مختلف

اهداف	SCNR = -20 dB		SCNR = -22 dB		SCNR = -24 dB		SCNR = -26 dB		SCNR = -28 dB		SCNR = -30 dB	
	فاصله (کیلومتر)	فرکانس داپلر (هرتز)	فاصله (کیلومتر)	فرکانس داپلر (هرتز)	فاصله (کیلومتر)	فرکانس داپلر (هرتز)	فاصله (کیلومتر)	فرکانس داپلر (هرتز)	فاصله (کیلومتر)	فرکانس داپلر (هرتز)	فاصله (کیلومتر)	فرکانس داپلر (هرتز)
T_1	۵	۵۲	۵	۵۲	۵	۵۲	۵	۵۲	۵	۵۲	۵	۵۲
T_2	۲۰	-۵۸	۲۰	-۵۸	۲۰	-۵۸	۲۰	-۵۸	۲۰	-۵۸	۲۰	-۵۸
T_3	۵۰	۶۲	۵۰	۶۲	۵۰	۶۲	۵۰	۶۲	۵۰	۶۲	۵۰	۶۲
T_4	۷۵	-۷۴	۷۵	-۷۴	۷۵	-۷۴	۷۵	-۷۴	۷۵	-۷۴	۷۵	-۷۴
T_5	۱۰۰	۸۳	۱۰۰	۸۳	۱۰۰	۸۳	۱۰۰	۸۳	۱۰۵	-۲۱	۶۸	۴۸
T_6	۱۲۵	۹۳	۱۲۵	۹۳	--	--	۱۰۵	-۲۱	--	--	۱۰۵	-۲۱

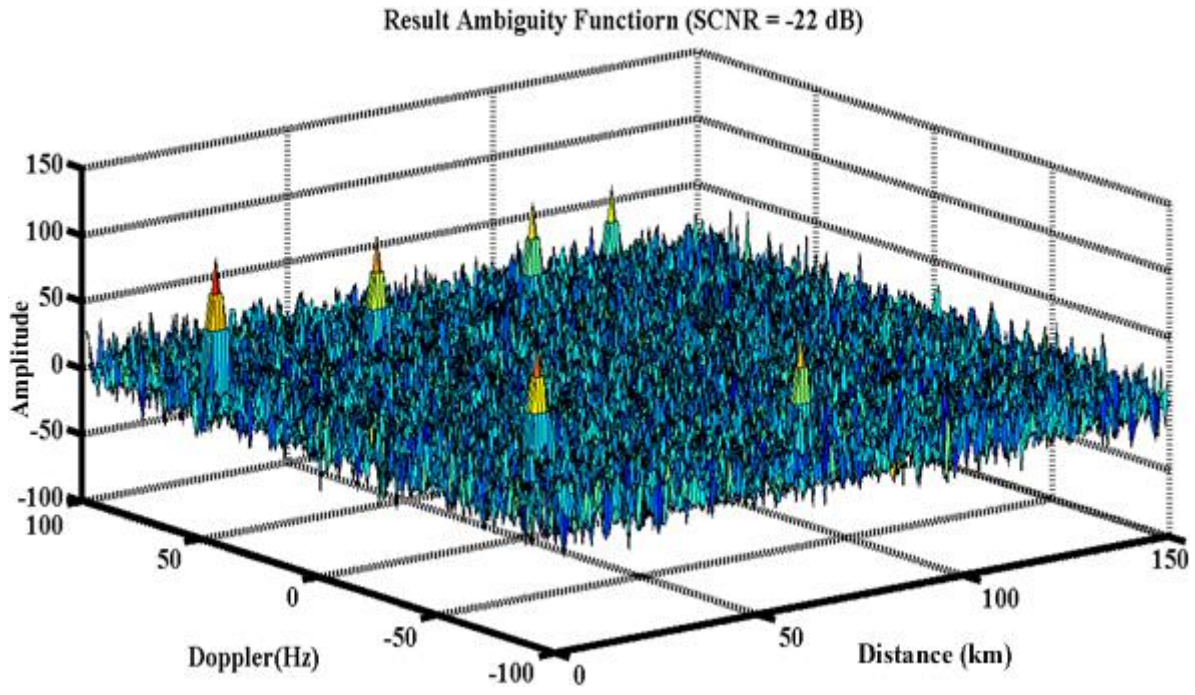
نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی در نسبت سیگنال به کلاتر و نویز ۲۰- دسیبل (شکل ۵- الف) نشان می‌دهند که تمام ۶ هدف به درستی آشکار شده‌اند و همچنین هیچ هدفی به اشتباه آشکار نشده است. به همین ترتیب نتایج برای شرایط SCNR برابر با ۲۲- دسیبل حاکی از آن است که به طور مشابه همه ۶ هدف به درستی آشکار شده‌اند و هیچ هدفی به اشتباه آشکار نشده است (شکل ۵- ب). این ارقام در SCNR برابر با ۲۴- دسیبل به ترتیب ۵ هدف صحیح و بدون اشتباه (شکل ۵- پ)، در SCNR برابر ۲۶- دسیبل به ترتیب ۵ هدف صحیح و یک هدف اشتباه (شکل ۵- ت)، در SCNR برابر ۲۸- دسیبل به ترتیب ۴ هدف صحیح و یک هدف اشتباه (شکل ۵- ث) و درنهایت در SCNR برابر ۳۰- دسیبل به ترتیب ۴ هدف صحیح و دو هدف اشتباه هستند (شکل ۵- ج).

[Downloaded from jnsee.sut.ac.ir on 2024-04-24]

[DOR: 20.1001.1.23223146.1397.5.2.1.1]



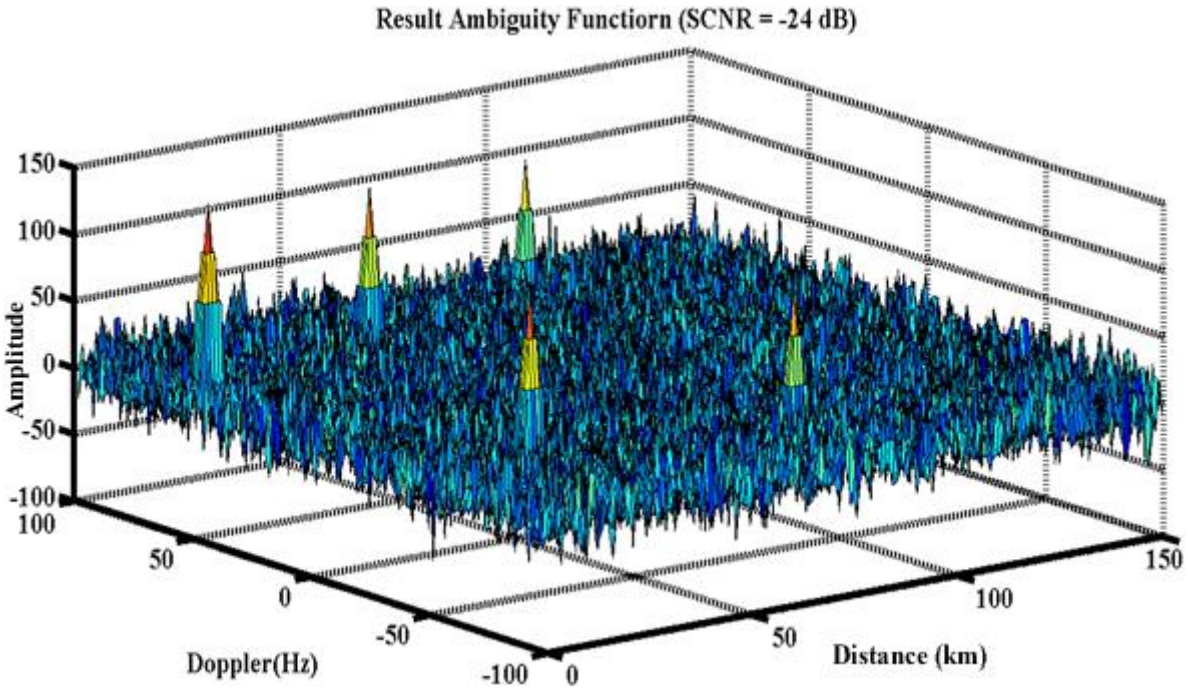
(الف)



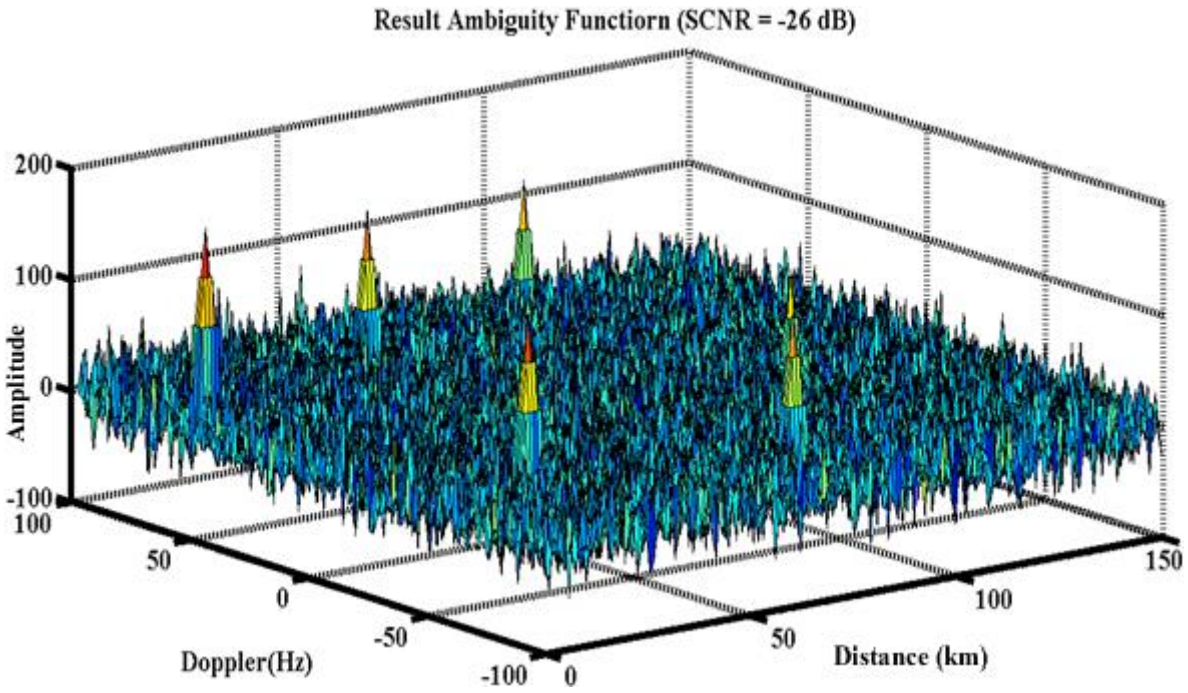
(ب)

[Downloaded from jnsee.sut.ac.ir on 2024-04-24]

[DOR: 20.1001.1.23223146.1397.5.2.1.1]



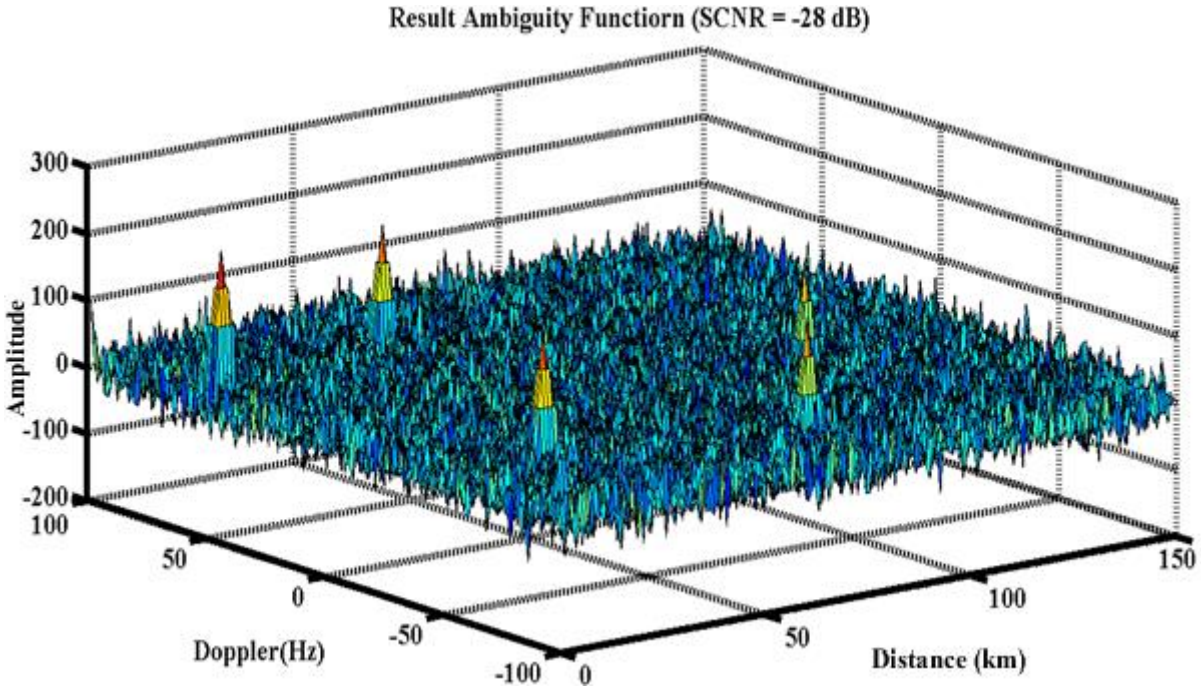
(پ)



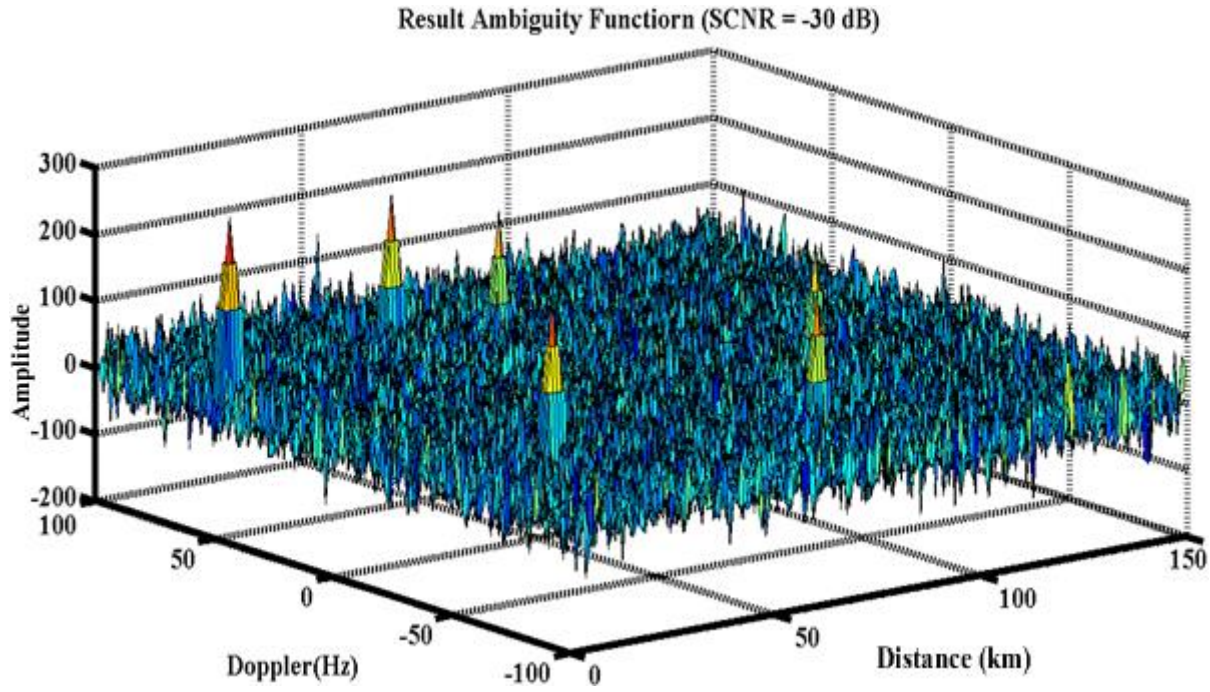
(ت)

[Downloaded from jnsee.sut.ac.ir on 2024-04-24]

[DOR: 20.1001.1.23223146.1397.5.2.1.1]



(ث)



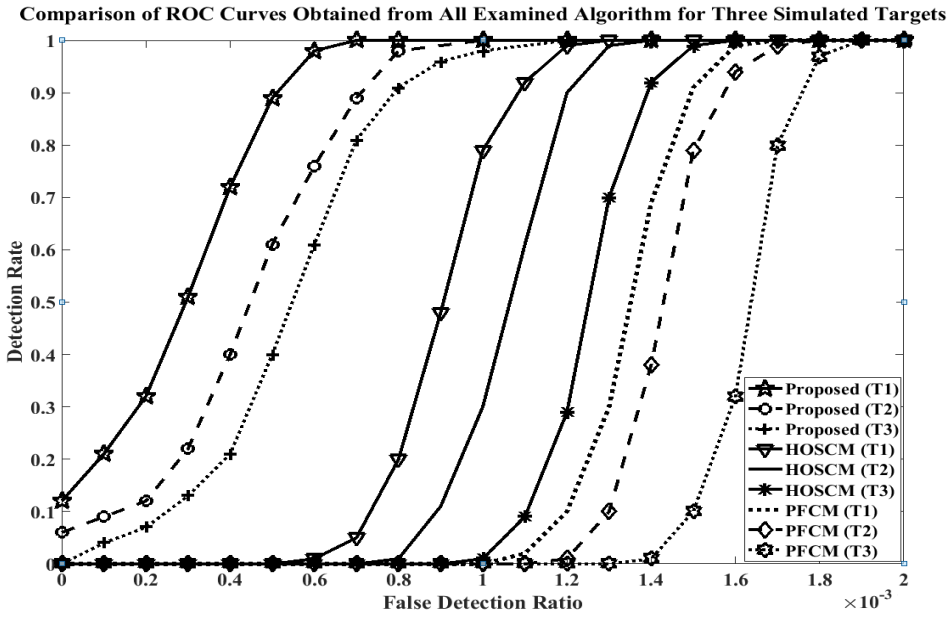
(ج)

شکل ۵. اهداف آشکار شده حاصل از اعمال الگوریتم پیشنهادی در سناریوی دوم برای شرایط: الف. SCNR = -20 dB ، ب. SCNR = -22 dB ، پ. SCNR = -24 dB ،ت. SCNR = -26 DB ، ث. SCNR = -28 dB و ج. SCNR = -30 dB

به منظور بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، شبیه‌سازی‌ها را برای SCNRهای مختلف انجام می‌دهیم و در هر مرحله نتایج بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی با دو الگوریتم رقیب PFCM و HOSCM مقایسه می‌شوند. در هر یک از روش‌ها، مقادیر

[Downloaded from jnsee.sut.ac.ir on 2024-04-24]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1397.5.2.1.1]

آشکار شده با مقادیر شبیه‌سازی شده، توسط دو معیار احتمال آشکارسازی P_d و احتمال هشدار غلط P_{fa}، مقایسه می‌شوند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که الگوریتم پیشنهادی، در تمام SCNRهای آزموده شده نسبت به الگوریتم‌های رقیب، هم در احتمال آشکارسازی و هم در احتمال هشدار غلط، برتری قابل ملاحظه‌ای دارد. نتایج بدست آمده از این مقایسه‌ها را می‌توانید در شکل (۶) ملاحظه کنید.



شکل ۶. درصد آشکارسازی بر حسب احتمال هشدار غلط در سناریوی دوم برای روش‌های این مقاله. سه منحنی Proposed(T1)، Proposed(T2) و Proposed(T3) به نتایج حاصل از اعمال روش پیشنهادی در مورد به ترتیب اهداف اول و دوم و سوم دلالت دارند. به همین ترتیب سه منحنی بعدی مربوط به روش HOSCM برای همین سه هدف و سه نمودار آخر مربوط به روش PFCM برای آنها است.

سه منحنی اول مربوط به نتایج حاصل از اعمال روش پیشنهادی در مورد سه هدف اول است. به همین ترتیب سه منحنی بعدی مربوط به روش HOSCM و سه نمودار آخر مربوط به روش PFCM است. نتایج نشان می‌دهند که این روش‌ها در SCNRهای بالا اختلاف قابل توجهی ندارند. بطور مثال در SCNR برابر با ۲۳- دسیبل، روش پیشنهادی تنها ۲/۹ درصد نسبت به روش HOSCM و ۴/۲ درصد نسبت به روش PFCM برتری دارد. اما در SCNRهای پایین‌تر اوضاع کمی متفاوت است و این برتری محسوس‌تر به نظر می‌رسد. برای مثال در SCNR برابر با ۲۸- دسیبل، روش پیشنهادی ۲۲/۱ درصد نسبت به روش HOSCM و ۲۴/۶ درصد نسبت به روش PFCM برتری دارد. همچنین به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی در مورد سرعت انجام محاسبات، پردازش‌ها در کامپیوتری با مشخصات CPU: Intel Core i5 – 3210M. 2.5 GHz و Memory: 6GB ،HDD: 1TB انجام شدند و نتایج بدست آمده از روش پیشنهادی با دو روش رقیب مقایسه گردید. به منظور انجام این مقایسه، زمان ثبت شده برای عملیات آشکارسازی در طول هزار فریم برای هر سه روش محاسبه شد. نتایج حاصل از این مقایسه‌ها در جدول (۶) ملاحظه می‌شوند. نتایج نشان دادند که روش پیشنهادی علاوه بر برتری در آشکارسازی اهداف، در میزان سرعت انجام محاسبات و پردازش‌ها نیز نسبت به دو روش رقیب برتری دارد.

[Downloaded from jnsee.sut.ac.ir on 2024-04-24]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1397.5.2.1.1]

جدول ٦. مدت زمان انجام فرایند آشکارسازی در طول هزار فریم برای سه روش پیشنهادی، PFCM و HOSCM

الگوریتم	مدت زمان آشکارسازی در طول ۱۰۰۰ فریم (ثانیه)
روش پیشنهادی	۱۲۳
روش PFCM	۱۴۱
روش HOSCM	۱۷۶

٤- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش جدید برای شناسایی اهداف واقعی از میان قله‌های موجود در سلول‌های تابع ابهام، در شرایط با نویز و کلاتر بالا ارائه شد. در این روش یک سابقه زمانی از هر سلول تابع ابهام به عنوان یک سیگنال تصادفی در نظر گرفته شد. سپس تلاش شد که تعلق هر سلول از تابع ابهام جدید، به سابقه زمانی متناظر خود در قالب مسئله آزمون فرض‌های تصادفی بیان گردد. سرانجام با مشخص نمودن فرض صحیح، تعلق هر سلول از تابع ابهام به هدف یا نویز و کلاتر مشخص گردید.

به منظور بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، شبیه‌سازی‌ها را برای SCNRهای مختلفی انجام دادیم و در هر مرحله نتایج بدست آمده از روش پیشنهادی با دو روش رقیب PFCM و HOSCM مقایسه شدند. نتایج بدست آمده نشان دادند که این روش‌ها در SCNRهای بالا اختلاف قابل توجهی ندارند، بطور مثال در SCNR ۲۱- دسیبل و برای اهداف با سرعت بالا درصد آشکارسازی حاصل از روش پیشنهادی تنها ۳/۲ درصد نسبت به روش HOSCM و ۴/۷ درصد نسبت به روش PFCM برتری دارد. این مقادیر برای آشکارسازی اهداف با سرعت کمتر و در SCNR ۲۳- دسیبل به ترتیب ۲/۹ و ۴/۲ درصد بهبود را نشان می‌دهند. اما در SCNRهای پایین‌تر اوضاع کمی متفاوت است و این برتری محسوس‌تر می‌شود. برای مثال در SCNR ۲۶- دسیبل و برای اهداف با سرعت بالا درصد آشکارسازی برای روش پیشنهادی ۲۲/۶ درصد نسبت به روش HOSCM و ۲۵/۲ درصد نسبت به روش PFCM برتری دارد. این مقادیر برای آشکارسازی اهداف با سرعت کمتر و در SCNR ۲۸- دسیبل به ترتیب ۲۲/۱ و ۲۴/۶ درصد بهبود را نسبت به روش‌های رقیب نشان می‌دهند. بنابراین می‌توان از روش پیشنهادی در این مقاله برای آشکارسازی اهداف به ویژه در شرایط با کلاتر و نویز قوی استفاده کرد.

مراجع

[1] A. Zaimbashi, M. Derakhtian, and A. Sheikhi, "Evaluation of Detection Performance of Passive Bistatic Radar Detectors based on Commercial FM Radio Signals," *Journal of Radar*, vol. 1, p. 12, 2014.

[2] P. E. Howland, "Target tracking using television-based bistatic radar," *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, vol. 146, pp. 166-174, 1999.

[3] H. Griffiths and N. Long, "Television-based bistatic radar," in *IEE Proceedings F: Communications Radar and Signal Processing*, 1986, pp. 649-657.

[4] P. E. Howland, D. Maksimiuk, and G. Reitsma, "FM radio based bistatic radar," *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, vol. 152, pp. 107-115, 2005.

[5] R. Saini and M. Cherniakov, "DTV signal ambiguity function analysis for radar application," *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, vol. 152, pp. 133-142, 2005.

[6] D. Poullin, "Passive detection using digital broadcasters (DAB, DVB) with COFDM modulation,"

[Downloaded from jnsee.sut.ac.ir on 2024-04-24]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1397.5.2.1.1]

IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, vol. 152, pp. 143-152, 2005.

[7] D. K. Tan, H. Sun, Y. Lu, M. Lesturgie, and H. L. Chan, "Passive radar using global system for mobile communication signal: theory, implementation and measurements," *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, vol. 152, pp. 116-123, 2005.

[8] M. Cherniakov, "Space-surface bistatic synthetic aperture radar-prospective and problems," in *RADAR 2002*, 2002, pp. 22-25.

[9] F. Colone, D. O'hagan, P. Lombardo, and C. Baker, "A multistage processing algorithm for disturbance removal and target detection in passive bistatic radar," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 45, pp. 698-722, 2009.

[10]K. Kulpa and Z. Czekala, "Masking effect and its removal in PCL radar," *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, vol. 152, pp. 174-178, 2005.

[11]A. Zaimbashi, M. Derakhtian, and A. Sheikhi, "GLRT-based CFAR detection in passive bistatic radar," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 49, pp. 134-159, 2013.

[12]S. V. Shojaedini and A. Goldar, "A Novel Algorithm for Jointly Detecting TDOA/FDOA in Bistatic Radars Based on Higher Order Statistics," presented at the The Fourth Iranian Conference on Engineering Electromagnetics (ICEEM 2016), Maritime Electronics and Communications Department, Imam Khomeini University of Maritime Sciences, Nowshahr, 2016.

[13]S. V. Shojaedini and A. Goldar, "A new method for jointly delay and Doppler estimation in radars by modeling cells of ambiguity function via a neural network," presented at the International Congress on Technology, Communication and Knowledge (ICTCK2015), Mashhad, Iran, 2015.

[14]Y. Zhao, Y. Zhao, C. Zhao, "Joint delay–Doppler estimation for passive bistatic radar with direct-path interference using MCMC method," *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 12, pp. 130-136, 2018.

[15]J. Li, J. Zhu, Z. Feng et al., "Passive multipath time delay estimation using MCMC methods," *Circuits Syst. Signal Process.*, vol. 34, no. 12, pp. 3897-3913, 2015.

[16]F. Bellili, S.B. Amor, S. Affes et al., "A new importance-sampling ML estimator of time delays and angles of arrival in multipath environments," *IEEE Int. Conf. Acoustics Speech and Signal Processing*, pp. 4252-4256, 2014.

[17]X. Zhang, H. Li, J. Liu et al., " Joint Delay and Doppler Estimation for Passive Sensing with Direct-Path Interference," *IEEE Transactions on Signal Processing*. v. 64, pp. 630-640, 2016.

[18]S. V. Shojaedini, "A new method for joint estimation of delay and Doppler from ambiguity function: combination of stochastic process and spatial processing for noise and clutter suppression," *International Journal of Electronics*, vol. 101, pp. 569-583, 2014.

[19]D. Musicki, S. Suvorova, M. Morelande, and B. Moran, "Clutter map and target tracking," in *7th International Conference on Information Fusion*, vol. 1, pp. 1-8, 2005.

[Downloaded from jnsee.sut.ac.ir on 2024-04-24]

[DOR: 20.1001.1.23223146.1397.5.2.1.1]