

## آشکارساز مرحله-به-مرحله بر پایه آزمون-فرض M تایی در رادارهای پسیو چندکاناله برای بهبود قدرت تفکیک در برد

عبدالله شمس‌الدین نژاد<sup>۱</sup>، دانشجو؛ امیر زعیم باشی<sup>۲</sup>، استادیار

۱- دانشکده فنی مهندسی - بخش برق - دانشگاه شهید باهنر کرمان - کرمان - ایران - abdollah.shamsadini@eng.uk.ac.ir

۲- دانشکده فنی مهندسی - بخش برق - دانشگاه شهید باهنر کرمان - کرمان - ایران - a.zaimbashir@uk.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله مسئله آشکارسازی چندکاناله به‌منظور بهبود قدرت تفکیک در برد در یک رادار پسیو مبتنی بر سیگنال‌های رادیو FM تجاری به‌صورت یک مسئله آزمون-فرض M تایی مدل‌سازی شده است. در این مسئله، جهت بهبود قدرت تفکیک در برد از چندین کانال کنار هم ارسالی توسط یک فرستنده رادیو FM استفاده شده است. برای حل مسئله آزمون-فرض فوق از روش آشکارسازی نسبت درستیابی استفاده شده است. با توجه به ماهیت متغیر بازمان سیگنال‌های رادیو FM و پنهان شدن اهداف ضعیف توسط اهداف قوی، آشکارساز پیشنهادی به‌صورت مرحله-به-مرحله پیاده‌سازی شده است. در واقع در هر مرحله از الگوریتم پیشنهادی یک هدف قوی آشکارسازی و از سیگنال دریافتی حذف می‌گردد تا امکان آشکارسازی برای اهداف ضعیف‌تر فراهم آید. به‌منظور بررسی عملکرد آشکارساز پیشنهادی، سناریوهایی شبیه‌سازی متعددی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند، یک آشکارساز چندکاناله علاوه بر بهره ترکیب کانال‌های فعال، قدرت تفکیک در برد اهداف را نیز بهبود می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** رادارهای پسیو دوپایه، رادیو FM، بهبود قدرت تفکیک در برد، آشکارساز چندکاناله بر اساس نسبت درست‌نمایی توسعه‌یافته.

## Multistage Target Detector Based on M-ary Hypothesis Testing Approach in Multi-Channel Passive Bistatic Radars to Improve Target Range Resolution

Abdollah Shamsadin Nejad<sup>1</sup>, student, Amir Zaimbashi<sup>2</sup>, Assistant professor

1- Electrical Engineering Department, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, Email: abdollah.shamsadini@eng.uk.ac.ir

2- Electrical Engineering Department, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, Email: a.zaimbashir@uk.ac.ir

**Abstract:** In this paper, in order to improve target range resolution, target detection problem in FM-based passive bistatic radar (PBR) is modeled as an M-ary hypothesis testing problem. To do so, we exploit some adjacent channels being transmitted from a same FM transmitter and solve the detection problem based on generalized likelihood ratio test (GLRT) framework. Due to the masking effect of strong targets as well as the time-variant nature of FM radio signal, we implement the proposed detector in a multistage manner. Indeed, in our proposed detector, targets are detected sequentially and the previously detected targets are treated as interferences to be removed yielding the detection of the weakest ones. Extensive simulation results are provided to demonstrate the capability of the proposed detection algorithm. Our simulation results show that the proposed multi-channel detector not only improves the target range resolution but also results in detection performance improvement offered by combination gain equal to the number of active channels.

**Keywords:** Passive Bistatic Radar, FM radio, Target Range Resolution, Multi-channel GLR detector.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۹/۲۰

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱/۱۴

نام نویسنده مسئول: امیر زعیم باشی نصرت‌آبادی

نشانی نویسنده مسئول: ایران-کرمان- میدان پژوهش- دانشگاه شهید باهنر کرمان- بخش برق- گروه مخابرات.

## ۱- مقدمه

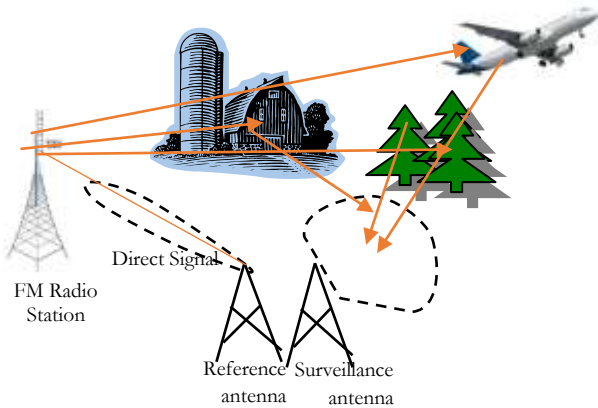
در یکی از آشکارسازها فرض شده است که دامنه سیگنال دریافتی در کانال‌های مختلف متفاوت است و به صورت تحلیلی اثبات شده است که در این شرایط به هیچ بهبودی در قدرت تفکیک نخواهید رسید. در آشکارساز دوم فرض شده است که دامنه سیگنال دریافتی در کانال‌های مختلف دقیقاً یکسان است و نشان داده شده است که قدرت تفکیک در برد بهبود پیدا می‌کند. در این مقاله، برای محقق شدن فرض یکسان بودن دامنه‌های دریافتی از اهداف طی کانال‌های مختلف رادیو FM (لزوماً این کانال‌ها چسبیده به هم نمی‌باشند)، یک شرط روی انتخاب فرکانس حامل سیگنال‌های چندکاناله قرار داده شده است [۱۳، ۱۴]. در واقع در مقاله [۱۳] به این مهم اشاره می‌شود که لزوماً افزایش پهنای باند سیگنال مورد پردازش منجر به بهبود قدرت تفکیک در برد نمی‌گردد. در مقاله [۱۴] بحث آشکارسازی چندکاناله در قالب یک مسئله جامع حل شده است. به طوری که در این مقاله فرض شده است دامنه یکسری از کانال‌ها را می‌توان ثابت فرض کرد (کانال‌های نزدیک به هم) و دامنه یکسری از کانال‌ها را نمی‌توان یکسان فرض نمود. بنابراین از کانال‌های سری اول برای بهبود قدرت تفکیک در برد و از کانال‌های سری دوم برای بهبود کیفیت آشکارسازی استفاده شده است.

در این مقاله، برخلاف کارهای [۱۳، ۱۴، ۱۹] مسئله آشکارسازی به صورت یک مسئله M تایی مدل شده است و آشکارسازی GLR بر این اساس استخراج شده است. علاوه بر این، در این مقاله، بجای استفاده از کانال‌های با فرکانس حامل<sup>۱</sup> مختلف که منجر به داپلرهای مختلف می‌شود، از یکسری کانال چسبیده به هم استفاده شده است. بنابراین برخلاف [۱۳، ۱۴، ۱۹] دیگر نیازی به جبران سازی داپلرهای دریافتی یک هدف در کانال‌های مختلف نیست. به طور مثال در [۱۳، ۱۴] از زمان‌های انتگرال‌گیری<sup>۲</sup> متفاوتی برای کانال‌های مختلف به منظور جبران داپلرهای دریافتی استفاده شده است. ولی در مقاله حال حاضر، به منظور بهبود قدرت تفکیک در برد از کانال‌های کنار هم استفاده شده است که دیگر نیازی به اعمال شرط روی فرکانس‌های حامل کانال‌های مختلف نیز نیست. به طور مثال با بهره گرفتن از سه کانال فرکانسی رادیو FM (با پهنای باند میانی برابر با 200kHz) پهنای باند میانی مورد پردازش آشکارساز برابر با 600kHz است که به راحتی می‌توان فرض نمود دامنه سیگنال دریافتی از اهداف طی کانال‌های مختلف یکسان است. البته لازم به ذکر است یکی از معایب این انتخاب، خالی بودن برخی کانال‌ها از سیگنال ارسالی است که هیچ بهبودی برای آشکارسازی اهداف را به همراه نخواهد داشت. از طرفی، با توجه به اینکه کانال‌های مختلف فرکانسی یک رادیو FM محتوای متفاوتی دارند، بنابراین در سیستم‌های پسیو مبتنی بر سیگنال‌های رادیو FM نمی‌توان بیان نمود که قدرت تفکیک در این رادارها دقیقاً برابر چه عددی است، ولی ما در این مقاله نشان خواهیم داد که با بهره گرفتن از چندین کانال، علاوه بر بهبود کیفیت آشکارسازی، تا حد زیادی قدرت تفکیک نیز تثبیت می‌گردد. به عبارتی، تغییرات قدرت تفکیک

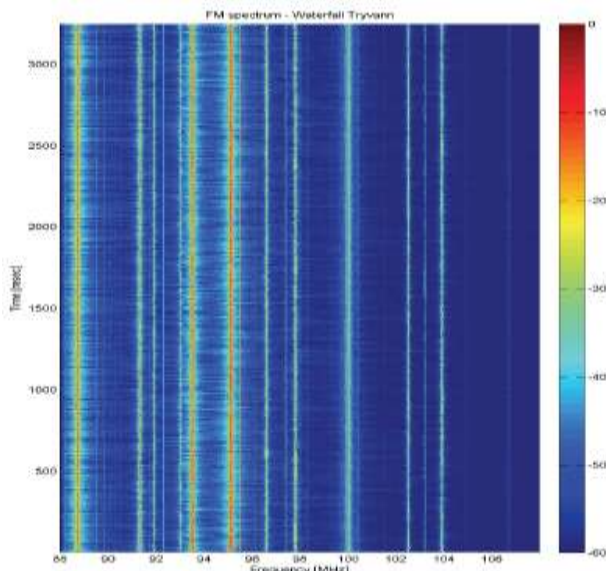
امروزه با مطرح شدن بحث ادغام سیستم‌های مخابراتی و راداری، رادارهای پسیو مبتنی بر سیگنال‌های مغتنم موجود در محیط، جایگاه بهتری در بین سیستم‌های راداری پیدا کرده‌اند [۳-۱]. رادارهای پسیو معمولاً از سیگنال‌های تلویزیون آنالوگ<sup>۱</sup> [۴]، رادیو FM<sup>۲</sup> [۵، ۶]، DVB-T<sup>۳</sup> [۷]، DAB<sup>۴</sup> [۸]، GSM<sup>۵</sup> [۹] و LTE<sup>۶</sup> [۱۰] برای آشکارسازی اهداف بهره می‌گیرند. در حالت کلی انتخاب یک سیگنال مناسب، به پارامترهای زیادی مثل ناحیه تحت پوشش فرستنده آن سیگنال، توان، فرکانس، پهنای باند سیگنال و شکل تابع ابهام آن برمی‌گردد. به طوری که قدرت تفکیک در برد توسط پهنای باند سیگنال و کیفیت آشکارسازی اهداف به شکل تابع ابهام آن سیگنال‌ها برمی‌گردد. گر چه اغلب سیگنال‌های دیجیتال دارای تابع ابهام مناسب‌تری نسبت به سیگنال‌های آنالوگ هستند، ولی توان کمتر فرستنده‌های سیگنال دیجیتال بردهای کوتاه را قابل دسترس می‌سازد. بر این اساس شاید بتوان سیگنال‌های رادیو FM تجاری را یکی از بهترین سیگنال‌های آنالوگ موجود در نظر گرفت [۱۱]. در ادامه تمرکز ما بیشتر روی سیستم‌های پسیو مبتنی بر سیگنال‌های مغتنم رادیو FM است، ولی به راحتی می‌توان مباحث فوق را به سایر سیگنال‌های مغتنم نیز توسعه داد.

کارهای شاخص زیادی در حوزه سیستم‌های راداری پسیو دویاپه (PBR) مبتنی بر سیگنال‌های رادیو FM (FM-PBR) انجام گرفته است [۵، ۶، ۱۲] ولی سیستم‌های FM-PBR که تنها با یک کانال رادیو FM به آشکارسازی اهداف می‌پردازند، به دلیل ماهیت متغیر بازمان سیگنال یک کانال، یک عملکرد متغیر بازمانی را نیز نتیجه می‌دهند که از دید یک طراح سیستم رادار، جالب نیست [۱۰]. برای حل مشکلات فوق، استفاده از چندین کانال رادیو FM مربوط به یک فرستنده خاص پیشنهاد شده است [۱۳-۱۶]. به طور مثال در [۱۲] یک آشکارساز چندکاناله دومرحله‌ای برای مقاوم‌سازی عملکرد آشکارسازی در برابر تغییرات سیگنال‌های رادیو FM در کانال‌های مختلف پیشنهاد شده است. در واقع در [۱۲]، با به کارگیری چندین کانال رادیو FM به بهبود کیفیت آشکارسازی پرداخته شده است. در حوزه بهبود قدرت تفکیک در رادارهای پسیو مبتنی بر سیگنال‌های مغتنم رادیو FM می‌توان به مقالات زیر اشاره نمود. در [۱۶-۱۸] با در اختیار داشتن دیتای عملی و کنار هم قرار دادن سیگنال‌های کانال‌های مختلف در حوزه فرکانس، به بررسی قدرت تفکیک پرداخته شده است. در واقع با قرار دادن کانال‌های مختلف کنار هم، پهنای باند سیگنال مورد پردازش یک آشکارساز افزایش و در نتیجه می‌توان به بهبود قدرت تفکیک در برد نیز امیدوار بود. در این مقاله سؤالات متعددی در مورد کیفیت آشکارسازی مطرح شده است که بی‌پاسخ رها شده‌اند. در [۱۳، ۱۴، ۱۹] کلیه سؤالات مطرح شده در مقالات [۱۸-۱۶] به صورت تحلیلی پاسخ داده شده است. نکته جالب دیگر در [۱۹]، مدل‌سازی مسئله آشکارسازی به صورت یک آزمون فرض باینری است که تحت فرضیات مختلف به استخراج دو آشکارساز GLRT<sup>۷</sup> پرداخته شده است.

به باند پایه انتقال می‌یابند و سرانجام در کنار یکدیگر با فواصل قابل تنظیم توسط پارامترهای  $F_i$  به ازای  $i = 1, \dots, L$  قرار می‌گیرند.



شکل ۱: شمای کلی یک رادار پسیو دوپایه مبتنی بر سیگنال‌های مغتنم



شکل ۲: کانال‌های مختلف یک ایستگاه رادیو FM در طی زمان مختلف [۱۶]

با توجه به اینکه سیگنال مسیر مستقیم دریافتی ناشی از کانال‌های مختلف رادیو FM در کانال مراقبت (کانال مورد آشکارسازی) حدود 70dB از قوی‌ترین اهداف دریافتی در این کانال، توان بیشتری دارد و همچنین به دلیل پنهان شدن اهداف ضعیف توسط اهداف قوی، ما مسئله آشکارسازی در یک سیستم FM-PBR را به صورت یک مسئله آزمون-فرض M تایی مطابق رابطه (۱) مدل‌سازی نموده‌ایم:

$$\begin{cases} \mathcal{H}_0: \mathbf{x} = \mathbf{Hc} + \mathbf{n} \\ \mathcal{H}_1: \mathbf{x} = \mathbf{s}_1 \alpha_1 + \mathbf{Hc} + \mathbf{n} \\ \mathcal{H}_2: \mathbf{x} = \mathbf{s}_2 \alpha_2 + \mathbf{s}_1 \alpha_1 + \mathbf{Hc} + \mathbf{n} \\ \mathcal{H}_3: \mathbf{x} = \mathbf{s}_3 \alpha_3 + [\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2]^T [\alpha_1, \alpha_2]^T + \mathbf{Hc} + \mathbf{n} \\ \vdots \\ \mathcal{H}_k: \mathbf{x} = \mathbf{s}_k \alpha_k + [\mathbf{s}_1, \dots, \mathbf{s}_{k-1}]^T [\alpha_1, \dots, \alpha_{k-1}]^T + \mathbf{Hc} + \mathbf{n} \\ \vdots \\ \mathcal{H}_M: \mathbf{x} = \mathbf{s}_M \alpha_M + [\mathbf{s}_1, \dots, \mathbf{s}_{M-1}]^T [\alpha_1, \dots, \alpha_{M-1}]^T + \mathbf{Hc} + \mathbf{n} \end{cases} \quad (1)$$

که M معرف تعداد اهداف قابل آشکارسازی بوده که خود پارامتری مجهول است. به طور مثال در رابطه (۱)، فرضیه  $\mathcal{H}_k$  بیانگر فرضیه

در برد و کیفیت آشکارسازی نسبت به زمان کاهش می‌یابد. در این مقاله شبیه‌سازی‌های متعددی ارائه شده است تا تمامی نکات مهم بحث آشکارسازی چندکاناله شفاف گردد تا یک طراح رادار پسیو بتواند بر اساس این نکات به طراحی یک سیستم پسیو بپردازد.

## ۲ مدل‌سازی مسئله آشکارسازی چندکاناله

در حالت کلی می‌توان ساختار یک رادار پسیو را به صورت شکل (۱) در نظر گرفت که در آن از یک ایستگاه رادیو FM به عنوان فرستنده استفاده می‌شود. در طرف گیرنده معمولاً دودسته آنتن (یا یک دسته آنتن با دو کانال پردازشی متفاوت) بکار گرفته می‌شود که یکی به عنوان آنتن‌های کانال مرجع شناخته می‌شود که هدف آن دریافت سیگنال ارسالی فرستنده است و دیگری به عنوان آنتن‌های کانال مراقبت شناخته می‌شود که در آن سیگنال‌های همچون نویز محیطی، سیگنال مسیر مستقیم از فرستنده به گیرنده، سیگنال‌های چندمسیره (کلاتر) و سیگنال‌های دریافتی از اهداف مورد آشکارسازی دریافت می‌شود [۵-۶]. همچنین فرض می‌شود L کانال رادیو FM از یک ایستگاه رادیو FM به صورت هم‌زمان در حال پخش برنامه‌های خود می‌باشند. به طور مثال در شکل (۲) کانال‌هایی مختلف فرکانسی که در طی زمان‌های مختلف در حال پخش می‌باشند، آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در بازه فرکانسی 91MHz تا 96MHz کانال‌هایی زیادی در حال پخش برنامه‌های خود می‌باشند که ایده استفاده از کانال‌های کنار هم را نیز به خوبی تأیید می‌کند.

بدون از دست دادن کلیت مسئله فرض می‌کنیم، L کانال مجاور رادیو FM در بازه فرکانسی  $[F_s, F_e]$  قرار دارند. در این صورت هرگاه B معرف فاصله بین کانال‌ها در استاندارد مربوط به رادیو FM باشد (که برابر با 200kHz است)، خواهیم داشت  $F_e - F_s = LB$ . در این صورت فرکانس مرکزی در پهنای باند میانی مورد استفاده برابر با  $F_c = \frac{F_e + F_s}{2}$  خواهد بود. با این اوصاف، می‌توان بازه فرکانسی مربوط به کانال L در بازه فرکانسی  $[F_s + (L-1)B, F_s + LB]$  در نظر گرفت. در ادامه فرض می‌شود که فرکانس  $F_c$  در نهایت در گیرنده سوپر هتروداین مورد استفاده به فرکانس صفر نگاشت می‌شود. بنابراین پهنای باند سیگنال باند پایه مورد پردازش برابر با  $B_{max} = \frac{LB}{2}$  خواهد بود که نیازمند فرکانس نمونه‌برداری حداقل برابر با  $f_s = LB$  هستیم. در شکل ۳، بلوک دیاگرام روش پیشنهادی با روش ارائه شده در [۱۳] مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌طور که مشخص است، روش پیشنهادی از پیچیدگی محاسباتی خیلی کمتری (تقریباً  $\frac{1}{L}$ ) در فراهم آوردن سیگنال باند پهن برای آشکارسازی برخوردار است. در این شکل، بلوک LPF معرف فیلتر پایین‌پایین گذری است که قبل از کنار هم چیدن کانال‌ها در روش [۱۳] مورد استفاده قرار می‌گیرد و فرکانس قطع آن کمتر از 100kHz است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برخلاف روش پیشنهادی، در روش پیشنهادی در [۱۳] تک‌تک کانال‌ها به صورت مجزا

می‌کند. با این اوصاف،  $\alpha_i$  دامنه مختلط دریافتی مربوط به هدف شماره  $i$  است که دامنه‌های مختلط اهداف تداخلی در بردار  $\mathbf{g}_{k-1}$  جمع شده‌اند. به عبارتی:

$$\mathbf{g}_{k-1} = [\alpha_1, \dots, \alpha_{k-1}]^T \quad (5)$$

در رابطه (۲)، ستون‌های ماتریس  $\mathbf{H}$  زیر فضای کلاتر را می‌گسترانند<sup>۱۱</sup> که خود به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1, \dots, \mathbf{h}_p] \quad (6)$$

درواقع در رابطه (۶) فرض شده است که زیر فضای کلاتر با  $P$  ستون ماتریس  $\mathbf{H}$  گسترانیده می‌شوند به طوری که ستون  $p$ ام به صورت  $\mathbf{h}_p = \mathbf{y}^{(n_p)} \odot \mathbf{e}^{(v_p)}$  مدل می‌شود. در این رابطه  $(n_p, v_p)$  معرف مختصات تأخیر- سرعت مؤلفه  $p$ ام کلاتر است. به همین ترتیب دامنه‌های مختلط اکوهای دریافتی از پردازشگرهای گسسته کلاتر را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$\mathbf{c} = [\mathbf{c}_1, \dots, \mathbf{c}_p]^T \quad (7)$$

با این اوصاف کلاتر به صورت  $\mathbf{H}\mathbf{c}$  مدل‌سازی شده است که فرض می‌شود ناشی از ماکزیمیم  $P$  پردازشگرهای گسسته با مختصات تأخیر- سرعت و  $(n_p, v_p)$  به ازای  $p = 1, \dots, P$  است (که  $P$  در آن قابل تنظیم است). برای جزئیات بیشتر در مورد مدل‌سازی کلاتر در حالت تک کاناله، خواننده علاقه‌مند را به مطالعه [۳] توصیه می‌کنیم. در رابطه (۲)، بردار  $\mathbf{n} \in \mathbb{C}^{NL \times 1}$  نیز بیانگر بردار نویز کل باند مورد پردازش می‌باشد.

وجود  $k$  هدف در سناریوی آشکارسازی در حضور نویز گرمایی سیستم، سیگنال مسیر مستقیم و سیگنال‌های چندمسیره است. لازم به ذکر است از میان  $k$  هدف در فرضیه  $\mathcal{H}_k$ ، یک هدف مورد تست است و  $(k-1)$  هدف دیگر به‌عنوان اهداف تداخلی می‌باشند. در این صورت می‌توان مدل سیگنال دریافتی تحت فرضیه  $\mathcal{H}_k$  در حالت چندکاناله را به صورت رابطه (۲) بیان نمود:

$$\mathbf{x} = \mathbf{s}_k \alpha_i + \mathbf{H}\mathbf{c} + \mathbf{T}_{k-1} \mathbf{g}_{k-1} + \mathbf{n} \quad (2)$$

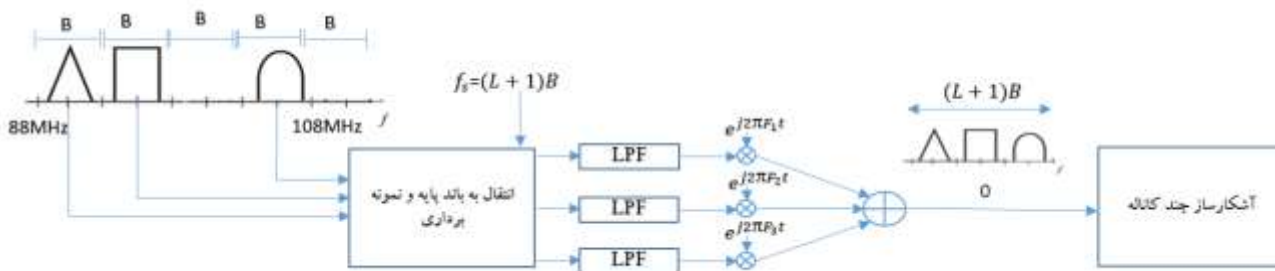
که  $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$  یک بردار با ابعاد  $N \times 1$  است که در آن  $N = T f_s$  بوده و  $T$  معرف زمان مورد پردازش (زمان انترگرال‌گیری) است. در رابطه (۲)، بردار سیگنال مورد تست ( $k$ امین هدف) در فرضیه  $\mathcal{H}_k$  و  $\mathbf{T}_{k-1}$  ماتریس اهداف تداخلی می‌باشند که  $\mathbf{T}_{k-1}$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{T}_{k-1} = [\mathbf{s}_1, \dots, \mathbf{s}_{k-1}] \quad (3)$$

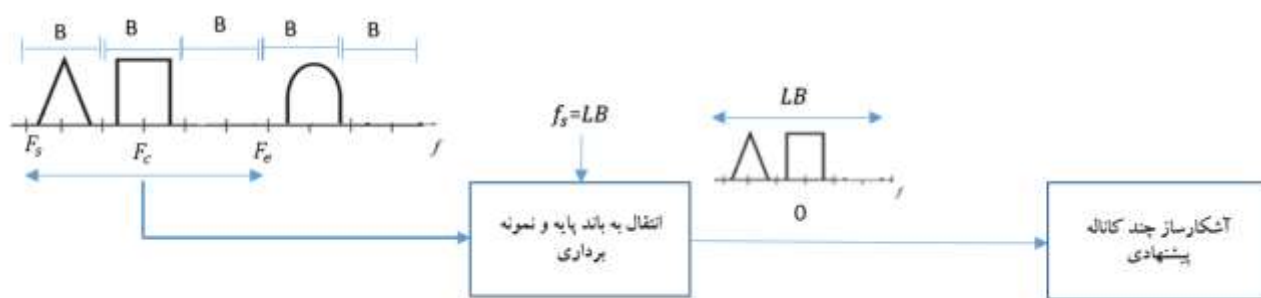
که بردار  $\mathbf{s}_i \in \mathbb{C}^{N \times 1}$  به ازای  $i = 1, \dots, k$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{s}_i = \mathbf{y}^{(n_k)} \odot \mathbf{e}^{(v_k)} \quad (4)$$

که  $(n_k, v_k)$  معرف مختصات تأخیر- سرعت دویپایه هدف  $k$ ام است. در رابطه (۱)، عضو  $n$ ام بردار  $\mathbf{e}^{(v_k)}$  به صورت  $[e^{(v_k)}]_n = e^{j 2\pi \frac{v_k}{\lambda_c} n T_s}$  به صورت  $T_s$  همان فواصل زمانی نمونه‌برداری بوده و برابر تعریف می‌شود که  $\lambda_c = \frac{c}{f_s}$ ؛  $T_s = \frac{1}{f_s}$  همان طول موج مربوط به فرکانس مرکزی  $F_c$  می‌باشد که  $\lambda_c = \frac{c}{F_c}$  که همان سرعت انتشار نور می‌باشد؛  $\mathbf{y}^{(n_k)}$  که  $\mathbf{P}^{n_k}(\mathbf{y}_r)$  همان سیگنال چند کانالی دریافتی در کانال مرجع می‌باشد و  $\mathbf{P}^{n_k}(\mathbf{z})$  نیز تنها یک شیفت  $n_k$  نمونه‌ای به بردار  $\mathbf{z}$  اعمال



(الف)



(ب)

شکل ۳: مقایسه ساختار روش‌های آشکارسازی ارائه شده (الف) در [۱۳] و (ب) روش پیشنهادی

$$l_k(x) \geq \eta_k \quad (11)$$

که آستانه آشکارسازی با توجه به احتمال هشدار کاذب مطلوب به صورت زیر به دست خواهد آمد [۶]:

$$p_{fa} = \beta q e^{-L\eta} \sum_{n=0}^{L-1} \frac{(L\eta)^n}{n!} \quad (12)$$

که  $\eta_k = \frac{N\eta}{N-(p+k)-\eta}$  است و  $q$  تعداد کل سلول‌های تاخیر-سرعت ای است که ماکزیمم گیری در رابطه (۸) روی آن‌ها انجام می‌گیرد و  $\beta$  یک ضریب ثابت با  $\beta \leq 1$  است که  $\beta$  به محتوای سیگنال‌های مورد پردازش از رادیو FM وابسته است. به طور مثال در [۶] نشان داده شده است برای دستیابی به سطح آزمون قابل کنترل یعنی رسیدن به احتمال هشدار کاذب کمتر از  $p_{fa}$  نیاز است  $\beta = 1$  قرار داده شود. با این انتخاب مطمئن خواهیم بود که با تغییر محتوای سیگنال رادیو FM احتمال هشدار کاذب به دست آمده ( $P_{fa}$ ) همواره کمتر از  $p_{fa}$  خواهد بود ( $P_{fa} \leq p_{fa}$ ). توجه داریم که  $p_{fa}$  احتمال هشدار کاذب مورد نظر است که توسط آن آستانه را تنظیم می‌کنیم ولی مقدار احتمال هشدار کاذب به دست آمده به ازای سیگنال‌های کانال‌های مختلف رادیو FM است. بر این اساس، در این مقاله ما از مقدار  $\beta = 1$  استفاده خواهیم نمود.

به طور خلاصه می‌توان الگوریتم مرحله-به-مرحله پیشنهادی را به صورت زیر بیان نمود:

در ابتدای کار فرضیات  $(\mathcal{H}_1, \mathcal{H}_0)$  مورد تست قرار می‌گیرند، هرگاه  $l_1(x) < \eta_1$  بیانگر این مطلب است هیچ هدفی برای آشکارسازی وجود ندارد و الگوریتم آشکارسازی متوقف می‌گردد. ولی  $l_1(x) > \eta_1$  بیانگر وجود هدف شماره ۱ (قوی‌ترین هدف) است که مختصات تاخیر-سرعت آن دقیقاً جایی است که ماکزیمم رابطه (۸) اتفاق می‌افتد. در این صورت لازم است الگوریتم برای تست فرضیات  $(\mathcal{H}_2, \mathcal{H}_1)$  ادامه پیدا کند تا وجود یا عدم وجود هدف شماره ۲ تست شود. برای این کار، هرگاه  $l_2(x) < \eta_2$  می‌توان نتیجه گرفت هیچ هدفی برای آشکارسازی وجود ندارد و الگوریتم آشکارسازی متوقف می‌گردد. ولی  $l_2(x) > \eta_2$  بیانگر وجود هدف شماره ۲ است که

### ۳- آشکارساز مرحله-به-مرحله پیشنهادی

برای حل مسئله آزمون-فرض M تایی ارائه شده در رابطه (۱) ما به روش آشکارسازی بر پایه نسبت درست‌نمایی توسعه یافته مرحله-به-مرحله ارائه شده در [۶] متوسل می‌شویم. توجه شود روش ارائه شده در [۶] برای حالت تک کاناله است که در این مقاله آن را به بحث آشکارسازی چندکاناله بسط خواهیم داد. توجه شود، مسئله آشکارسازی چندکاناله در کارهای قبلی ما در [۱۳، ۱۴، ۱۹] به صورت یک مسئله آزمون-فرض باینری مدل‌سازی شده است، ولی در این مقاله با یک مسئله آزمون فرض M تایی روبرو هستیم. در این مقاله، علاوه بر اینکه مدل سیگنال دریافتی متفاوت با مقالات [۱۳، ۱۹، ۱۴] است، مسئله آشکارسازی به صورت یک مسئله آزمون-فرض M تایی نیز مدل‌سازی شده است. در واقع در روش آشکارسازی مرحله-به-مرحله دنباله‌ای از فرضیات  $(\mathcal{H}_1, \mathcal{H}_0), (\mathcal{H}_2, \mathcal{H}_1), \dots, (\mathcal{H}_k, \mathcal{H}_{k-1})$  مورد تست قرار می‌گیرد. به طور مثال، هرگاه مختصات تاخیر-سرعت هدف  $k$ ام مجهول فرض شود، آماره آشکارسازی برای تست بین فرضیات  $\mathcal{H}_k$  و  $\mathcal{H}_{k-1}$  به صورت زیر قابل استخراج است [۶]:

$$l_k(x) = 2N \max_{(n_k, v_k)} \left( \frac{|s_k^H \Pi_{k-1}^\dagger x|^2}{(x^H \Pi_{k-1}^\dagger x)(s_k^{(m)H} \Pi_{k-1}^\dagger s_k)} \right) \quad (8)$$

که  $U_{k-1}$  ماتریس حاوی سیگنال‌های تداخلی برای انجام آزمون-فرض بین فرضیات  $\mathcal{H}_k$  تا  $\mathcal{H}_{k-1}$  است که به صورت رابطه (۹) قابل تعریف می‌باشد:

$$U_{k-1} = [H, T_{k-1}] \quad (9)$$

در این صورت ماتریس تصویر بر فضای عمود بر سیگنال‌های تداخلی یعنی  $\Pi_{k-1}^\dagger$  به صورت زیر قابل بیان است:

$$\Pi_{k-1}^\dagger = I_N - U_{k-1} (U_{k-1}^H U_{k-1})^{-1} U_{k-1}^H \quad (10)$$

با توجه به آماره آشکارسازی در رابطه (۸)، آزمون GLR برای تست بین فرضیات  $\mathcal{H}_k$  و  $\mathcal{H}_{k-1}$  به صورت زیر در خواهد آمد:

سیگنال  $S_1$  و بدترین آن مربوط به سیگنال  $S_3$  است. علاوه بر این کیفیت سیگنال‌ها در خروجی آشکارساز نیز به نسبت پیک-به-بزرگترین سطح ساید لوب یا PSLR<sup>۱۱</sup> نیز وابسته است. با این معیار مجدداً سیگنال‌های  $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$  به ترتیب بالاترین تا پایین‌ترین PSLR را به خود اختصاص می‌دهند.

در ادامه با توجه به ترکیب‌های مختلف سه سیگنال فوق به بررسی بهبود در قدرت تفکیک آشکارساز چندکاناله پیشنهادی پرداخته خواهد شد. در جدول (۱) ترکیب‌های مختلف این سه سیگنال به همراه خالی بودن حداکثر دو کانال از سه کانال مجاور هم، معرفی شده‌اند. در این جدول 0 معرف خالی بودن آن کانال از سیگنال ارسالی است. به‌طور مثال  $S_1 + 0 + S_3$  معرف یک سیگنال سه کاناله است که کانال اول آن  $S_1$ ، کانال دوم آن خالی (عدم ارسال سیگنال توسط فرستنده) و کانال سوم سیگنال  $S_3$  است. بنابراین در ترکیب فوق دو کانال فعال و یک کانال غیرفعال وجود دارد.

#### ۱-۴- بررسی خروجی آشکارساز تک هدفه در حالت چندکاناله

همان‌طور که به آن اشاره شد برای بررسی میزان بهبود قدرت تفکیک در برد می‌توان از معیار پهنای 3dB خروجی آشکارساز برحسب برد، بهره گرفت. برای این منظور یک سناریوی تک هدفه در نظر می‌گیریم که در آن سیگنال‌های تداخلی و نویز وجود ندارد (یا در مرحله اول آشکارساز حذف شده‌اند). همچنین در ادامه برای راحتی، برد و داپلر هدف را برابر صفر قرار می‌دهیم. توجه داریم سیگنال‌های رادیو FM سیگنال‌های پیوسته‌ای می‌باشند و به ازای برد و داپلرهای غیر صفر، پیک خروجی آشکارساز در برد و داپلر موردنظر خواهد بود. در شکل‌های (۶)-(۹) به بررسی خروجی آشکارساز در سناریوی تک هدفه فوق به ازای ترکیب‌های مختلف دو کاناله سیگنال‌های مختلف  $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$  پرداخته شده است. نتایج این شکل‌های بیانگر نکات زیر می‌باشند:

(۱) با افزایش تعداد کانال‌های فعال از یک‌به‌دو پهنای 3dB خروجی آشکارساز کاهش می‌یابد و این به معنی بهبود در قدرت تفکیک در برد روش پیشنهادی است. (۲) در حال دو کاناله کیفیت سیگنال مورد آشکارسازی که توسط معیار PSLR بررسی می‌گردد، تحت تأثیر سیگنال باکیفیت ضعیف ( $S_2$  یا  $S_3$ ) است. به‌طور مثال، ترکیب دو کاناله سیگنال‌های  $S_1$  و  $S_2$  به نسبت ترکیب  $S_1$  و  $S_3$  منجر به PSLR بهتری می‌گردد. در این میان ترکیب‌هایی به فرم  $S_i + 0$  به ازای  $i = 1, 2, 3$  تقریباً مشابه حالت تک کانال با سیگنال  $S_i$  می‌باشند (شکل ۹).

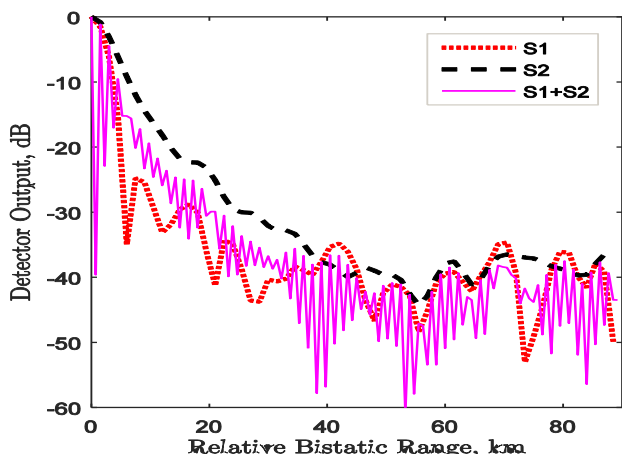
در شکل‌های (۱۰)-(۱۴) به بررسی خروجی آشکارساز سه کاناله به ازای ترکیب‌های مختلف سه سیگنال فوق پرداخته شده است. با بررسی این شکل‌های به نظر می‌رسد که باز پهنای 3dB خروجی آشکارساز نسبت به حالت تک کاناله و دو کاناله باریک‌تر شده است. ولی نکته قابل‌توجه در این شکل‌ها بالا آمدن سطح سایت لوب‌ها یا کم شدن

مختصات تاخیر-سرعت آن دقیقاً جایی است که ماکزیمم رابطه (۸) اتفاق می‌افتند. توجه شود بعد از یافتن هر هدف لازم است ماتریس اهداف تداخلی به‌صورت رابطه (۹) به‌روزرسانی شود، تا بتوان در حضور اهداف قوی اهداف ضعیف را آشکارسازی نمود به همین ترتیب الگوریتم ادامه پیدا می‌کند تا آماره آشکارسازی کوچک‌تر از آستانه آشکارسازی گردد و الگوریتم متوقف گردد.

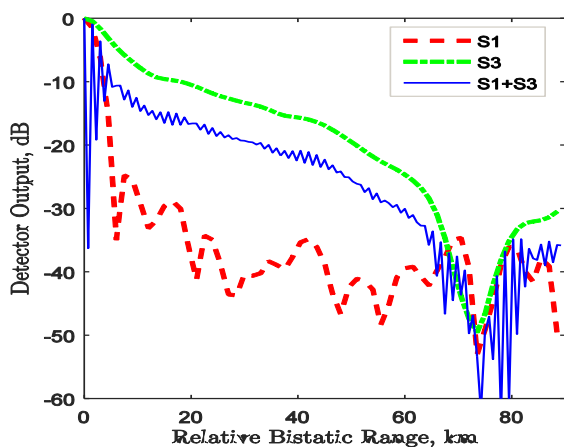
لازم به ذکر است آماره آشکارسازی به‌دست‌آمده در رابطه (۸) مشابه بحث آشکارسازی تک کاناله در [۶] است با این تفاوت که ذات سیگنال‌های مورد استفاده در آشکارساز پیشنهادی در این مقاله، سیگنال‌های چندکاناله مجاور می‌باشند. بنابراین می‌توان الگوریتم‌های برگشتی ارائه‌شده در [۶-۴] را برای پیاده‌سازی سریع الگوریتم مرحله-به-مرحله در این مقاله نیز بکار گرفت. در این الگوریتم‌های برگشتی سعی شده است از محاسبات مربوط به فرضیات قبلی برای کاهش حجم محاسبات استفاده گردد. همچنین در الگوریتم‌های برگشتی در [۴] و [۶] به ترتیب از تبدیل‌های FFT<sup>۱۱</sup> و CZT<sup>۱۲</sup> برای کاهش حجم محاسبات استفاده شده است. با توجه به تکراری بودن این مطالب و کمبود صفحات، در اینجا از ذکر مجدد آن‌ها خودداری می‌کنیم و خواننده علاقه‌مند را به مطالعه کارهای قبلی [۶-۴] توصیه می‌کنیم.

#### ۴ مثال‌های شبیه‌سازی شده

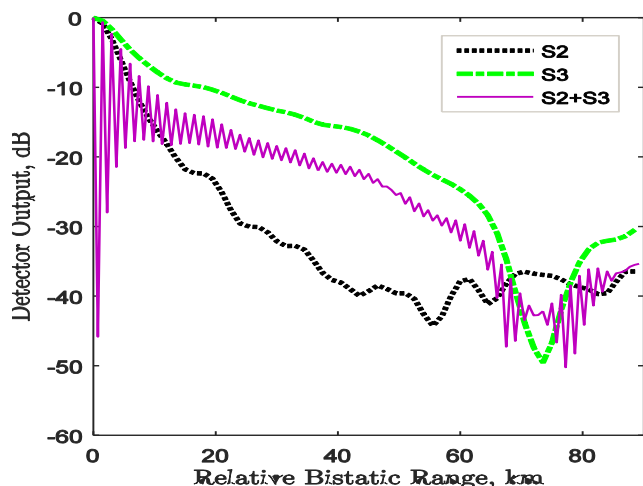
در این قسمت، چندین سناریوی شبیه‌سازی به‌منظور بررسی عملکرد آشکارساز پیشنهادی جهت بهبود قدرت تفکیک در برد در نظر گرفته شده است. در شبیه‌سازی این قسمت فرض شده است کلاتر در کانال‌های مختلف حداکثر تا برد 60km با تابع چگالی طیف توان گوسی با پهنای 3dB برابر با  $\pm 2Hz$  دریافت می‌شود. همچنین نسبت توان اکوهای تولیدکننده کلاتر به نویز (و سیگنال مسیر مستقیم به نویز) نیز در بازه بین 0dB تا 40dB (50dB تا 60dB) در نظر گرفته شده است. همان‌طور که از ساختار آشکارساز مرحله-به-مرحله نیز مشخص است، سیگنال‌های تداخلی نظیر کلاتر و سیگنال مسیر مستقیم در مرحله اول آشکارساز حذف می‌گردد. در ادامه تمرکز خود را روی بهبود قدرت تفکیک در برد اهداف و بررسی اثر کیفیت سیگنال‌های مورد استفاده در کانال‌های مختلف در بهبود تفکیک در برد قرار دهیم. برای این منظور، سه سیگنال  $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$  را در نظر می‌گیریم که طیف آن‌ها در صورت فعال بودن سه کانال مجاور حاوی سیگنال‌های فوق، در شکل (۴) آورده شده است. در شکل (۵) نیز خروجی آشکارساز GLR تک کاناله به ازای سه سیگنال  $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$  برحسب برد آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، محتوای متفاوت سیگنال‌های کانال‌های مختلف حاوی سیگنال‌های  $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$ ، منجر به قدرت تفکیک‌های متفاوت در برد می‌گردد. توجه داریم قدرت تفکیک در برد متناسب با پهنای 3dB خروجی آشکارساز برحسب برد است. بر این اساس، بهترین قدرت تفکیک مربوط به



شکل ۶: مقایسه بررسی قدرت تفکیک در سیگنال‌های مختلف تک کاناله  $(S_1, S_2)$  و دو کاناله با ترکیب  $(S_1 + S_2)$

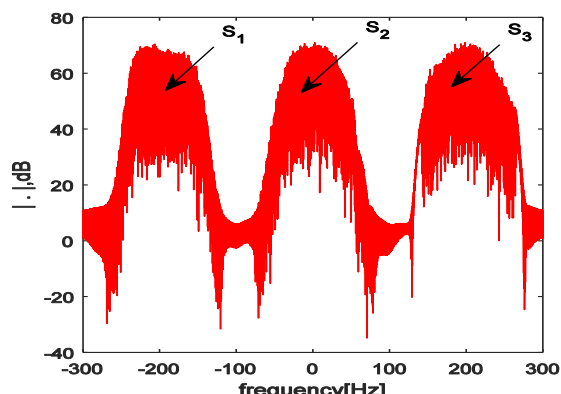


شکل ۷: مقایسه بررسی قدرت تفکیک در سیگنال‌های مختلف تک کاناله  $(S_1, S_3)$  و دو کاناله با ترکیب  $(S_1 + S_3)$

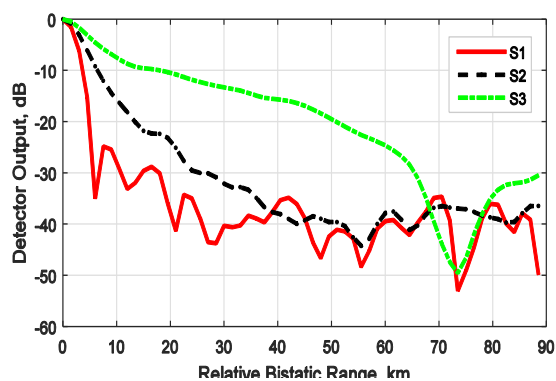


شکل ۸: مقایسه بررسی قدرت تفکیک در سیگنال‌های مختلف تک کاناله  $(S_2, S_3)$  و دو کاناله با ترکیب  $(S_2 + S_3)$

پارامتر PSLR متناسب با بدترین سیگنال مورد ترکیب است که این مسئله همان طوری که در ادامه بیان خواهد شد می‌تواند کیفیت آشکارسازهای اهداف نزدیک به هم را تحت تأثیر خود قرار دهد.



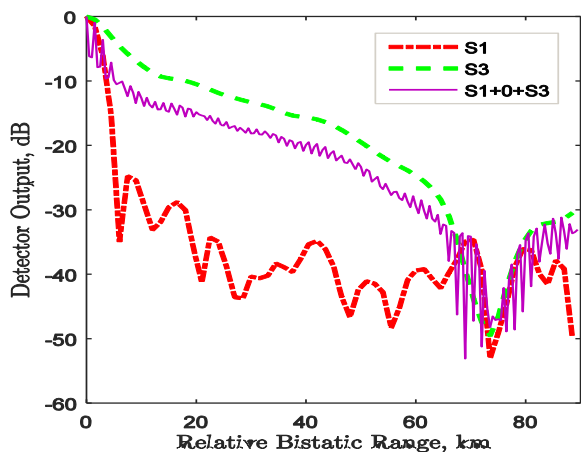
شکل ۴: قسمت فرکانس‌های مثبت طیف سه کانال مجاور در یک ایستگاه رادیو FM در صورت فعال بودن سه کانال



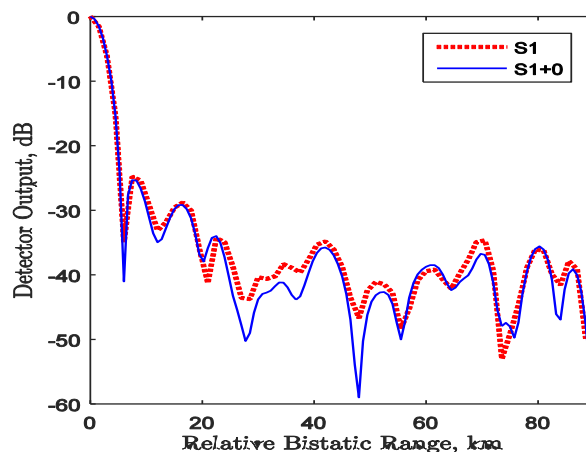
شکل ۵: خروجی آشکارساز پیشنهادی برحسب برد برای سه سیگنال  $S_1$  و  $S_2$  از سه کانال مجاور رادیو FM

جدول ۱: ترکیب‌های کانال‌های مختلف به ازای  $L=1,2,3$

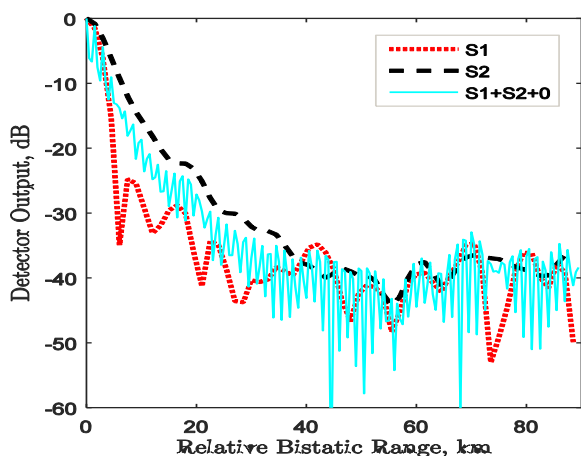
| ترکیب‌های کانال‌های مختلف  | تعداد کانال |
|--|-------------|
| $S_3, S_2, S_1$  |             |
| $S_3 + 0 \cdot S_2 + 0 \cdot S_1 + 0 \cdot S_2 + S_3, S_1 + S_3, S_1 + S_2$  |             |
| $S_1 + S_2 + S_3, S_1 + S_2 + 0 \cdot S_1 + 0 + S_3, 0 + 0 + S_3, 0 + S_2 + 0 \cdot S_1 + 0 + 0 \cdot 0 + S_2 + S_3$ |             |



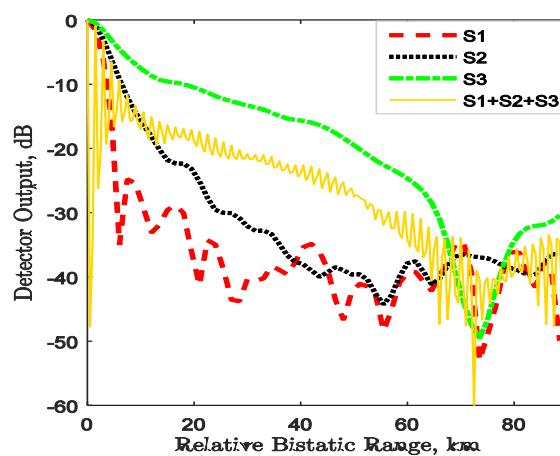
شکل ۱۲: مقایسه بررسی قدرت تفکیک در سیگنال‌های مختلف تک کاناله  $(S_1 + 0 + S_3)$  و سه کاناله با ترکیب  $(S_3, S_1)$



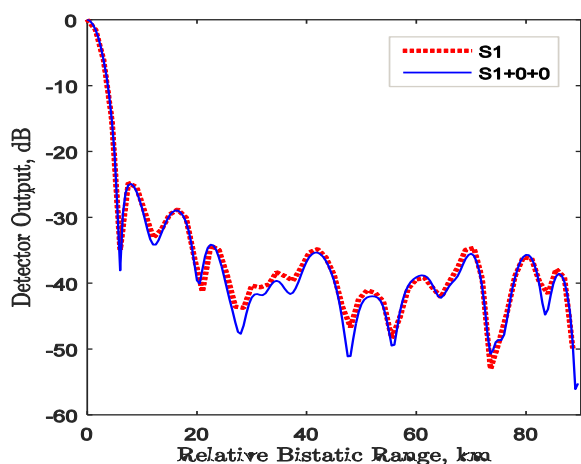
شکل ۹: مقایسه بررسی قدرت تفکیک در سیگنال تک کاناله  $(S_1)$  و دو کاناله با ترکیب  $(S_1 + 0)$



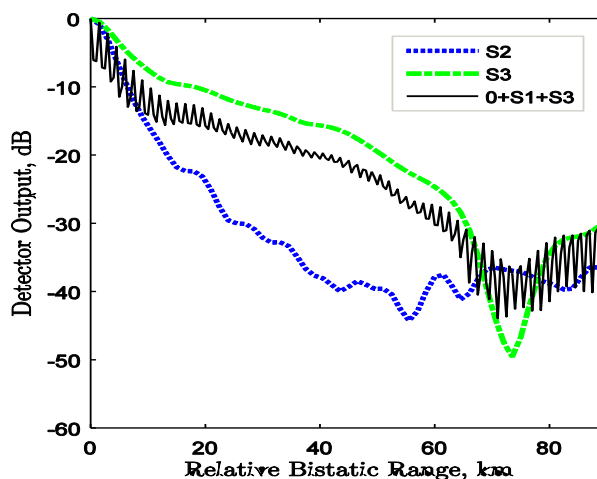
شکل ۱۳: مقایسه بررسی قدرت تفکیک در سیگنال‌های مختلف تک کاناله  $(S_1, S_2)$  و سه کاناله با ترکیب  $(S_1 + S_2 + 0)$ .



شکل ۱۰: مقایسه بررسی قدرت تفکیک در سیگنال‌های مختلف تک کاناله  $(S_1, S_2, S_3)$  و سه کاناله با ترکیب  $(S_1 + S_2 + S_3)$ .



شکل ۱۴: مقایسه بررسی قدرت تفکیک در سیگنال تک کاناله  $(S_1)$  و سه کاناله با ترکیب  $(S_1 + 0 + 0)$ .

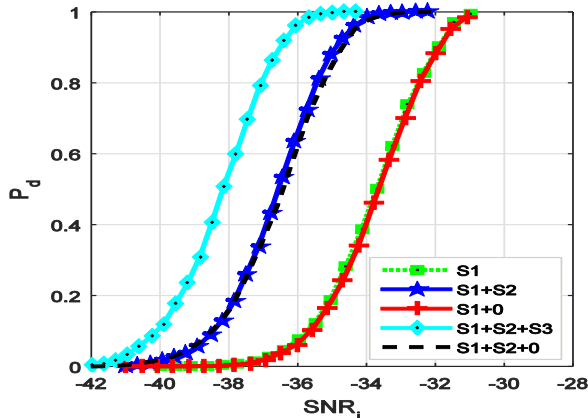


شکل ۱۱: مقایسه بررسی قدرت تفکیک در سیگنال‌های مختلف تک کاناله  $(S_2, S_3)$  و سه کاناله با ترکیب  $(0 + S_2 + S_3)$

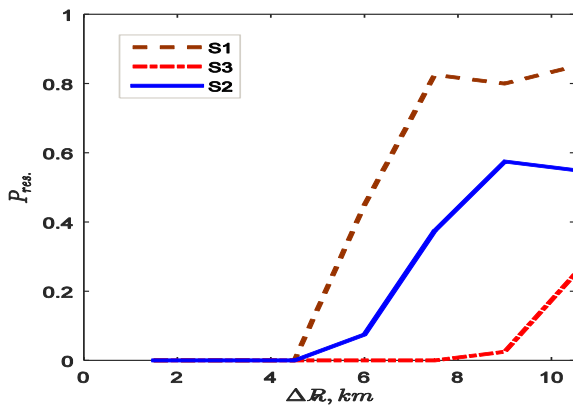
لازم به ذکر است که نتایج مشابه شکل (۱۴) می‌تواند برای سیگنال‌های  $S_2$  و  $S_3$  نیز به دست آید. در واقع در ادامه بررسی خواهیم



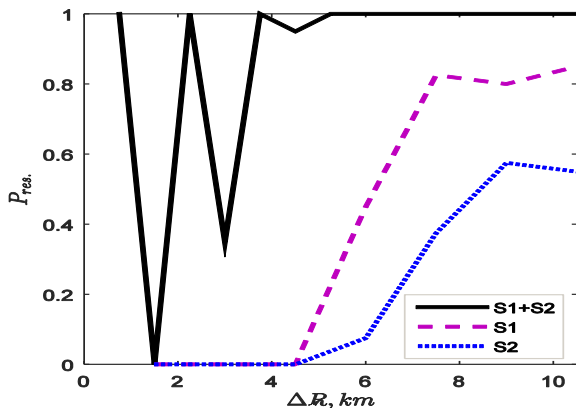
بررسی این موضوع پرداخته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بهره ترکیب تنها به تعداد کانال‌های فعال وابسته است ( $L_a$ ) و تعداد کانال غیرفعال در آن اثری ندارد. به عبارتی خواهیم داشت  $G_c = L$  چراکه با افزایش تعداد کانال‌ها توان نویز و تعداد نمونه‌های پردازش در طی زمان انتگرال‌گیری افزایش می‌یابد. بنابراین در صورت غیرفعال بودن کانالی، هیچ بهره ترکیبی به دست نخواهد آمد.



شکل ۱۶: مقایسه منحنی احتمال آشکارسازی برحسب  $SNR_i$  به ازای کانال‌های مختلف  $L=1,2,3$  وقتی در کانال‌های مجاور کانال خالی نیز وجود دارد و به ازای  $p_{fa} = 10^{-6}$



شکل ۱۷: مقایسه احتمال تفکیک در برد آشکارساز تک کاناله به ازای سیگنال مختلف  $S_3, S_2, S_1$



شکل ۱۸: مقایسه احتمال تفکیک در برد در حالت تک کاناله با سیگنال‌های  $S_2$  و  $S_1$  و دو کاناله با ترکیب  $(S_2 + S_1)$

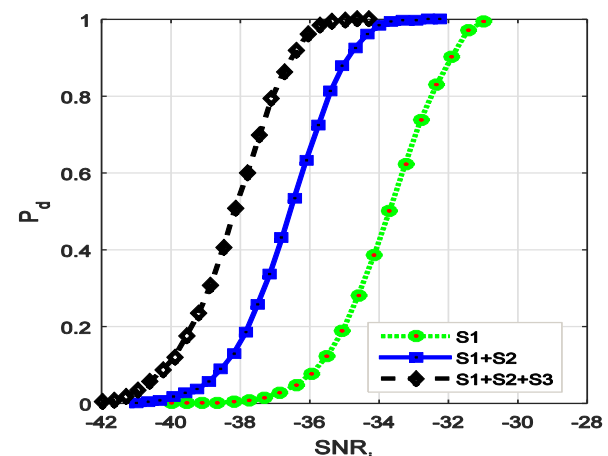
نمود که آیا کیفیت سیگنال مورد آشکارسازی (که با معیار PSLR سنجیده می‌شود) می‌تواند در میزان در تفکیک در برد اثر داشته باشد یا خیر.

#### ۲-۴- بررسی عملکرد آشکارساز تک هدفه در حالت چندکاناله

از نتایج شکل‌های فوق مشخص است که بر اساس معیار پهنای 3dB خروجی آشکارساز، شاید نتوان در مورد میزان بهبود در قدرت تفکیک در برد اظهارات دقیقی داشت. در واقع باید به این نکته توجه نمود که سیگنال‌های رادیو FM برای کاربردهای راداری طراحی نشده‌اند. بنابراین خیلی عجیب نیست که معیار پهنای 3dB خروجی آشکارساز را یک معیار تقریبی برای بررسی قدرت تفکیک در برد در رادارهای پسیو قلمداد نمود. برای بررسی دقیق‌تر این موضوع، ابتدا منحنی‌های احتمال آشکارسازی برحسب سیگنال-به-نویز در آشکارساز پیشنهادی به ازای کانال‌ها و ترکیب‌های مختلف آورده خواهد شد و سپس احتمال تفکیک دو هدف برحسب فاصله دو هدف آورده خواهد شد. برای این منظور نسبت سیگنال-به-نویز ( $SNR$ )<sup>۱۵</sup> هدف نام در یک سیستم  $L$  کاناله را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$SNR_i = \frac{|\alpha_i|^2}{N_0 B} \quad (۱۳)$$

که  $N_0$  چگالی طیف توان نویز سفید مورد استفاده برحسب وات بر هر تیز است. در شکل (۱۵) منحنی احتمال آشکارسازی در یک سناریوی تک هدفه به ازای مقادیر  $L$  مختلف (تعداد کانال‌ها) و احتمال هشدار کاذب  $p_{fa} = 10^{-6}$  آورده شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است با افزایش تعداد کانال‌های احتمال آشکارسازی اهداف بهبود می‌یابد که در ادامه به بهره به دست آمده بهره ترکیب<sup>۱۶</sup> می‌گوییم و آن را با نماد  $G_c$  بیان خواهیم نمود. نتایج این شکل نشان می‌دهد که بهره ترکیب دقیقاً برابر با  $G_c = L$  است. به عبارت دیگر، بهره ترکیب به ترتیب برای  $L = 2$  و  $L = 3$  به ترتیب برابر با 3dB و 4.77dB است.



شکل ۱۵: منحنی احتمال آشکارسازی برحسب  $SNR_i$  به ازای کانال‌های مختلف  $L=1,2,3$  و به ازای  $p_{fa} = 10^{-6}$

در مسئله مورد بررسی در این مقاله ممکن است چند تا از کانال‌های مورد ترکیب، خالی از سیگنال ارسالی باشد که در این خصوص انتظار داریم گین آشکارسازی چندکاناله کاهش می‌یابد. در شکل (۱۶) به

مراجعه به شکل (۹) متوجه خواهیم شد که دقیقاً در همین بردها خروجی آشکارساز رفتار پیکی دارد. حال با توجه به شکل (۱۰) می‌توان رفتار پیکی در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) را توجیه نمود. درواقع آشکارساز پیشنهادی اهداف را یکی‌یکی آشکار و از سناریو حذف تا هدف بعدی را آشکارسازی کند، بنابراین هر چه سطح ساید لوب‌ها بالاتر باشد، میزان حذف سیگنال‌های مجاور هم بیشتر خواهد شد که دقیقاً این اتفاق در شکل (۱۹) رخ داده است. همچنین با کاهش سطح ساید لوب‌ها (که با افزایش فاصله رخ می‌دهد) تأثیر یک هدف روی دیگر کاهش می‌یابد.

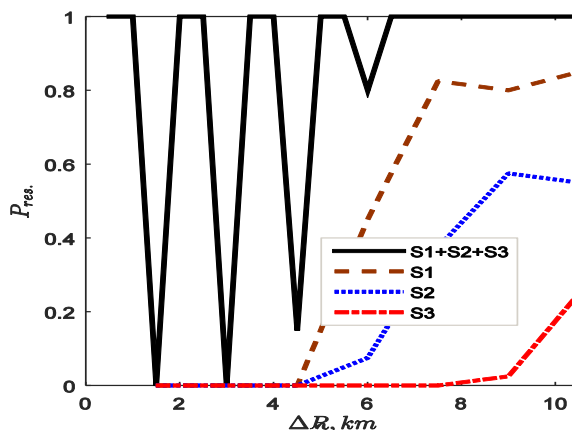
#### ۴-۴- بررسی عملکرد آشکارساز چندکاناله در حضور چند هدف

همان‌طور که به آن اشاره شده، به‌منظور رفع اثر پنهان شدن اهداف ضعیف توسط اهداف قوی، آشکارساز پیشنهادی به‌صورت مرحله-به-مرحله پیاده‌سازی شده است. درواقع در هر مرحله از الگوریتم پیشنهادی یک هدف قوی آشکارسازی و از سیگنال دریافتی حذف می‌گردد تا امکان آشکارسازی برای اهداف ضعیف‌تر فراهم آید. بنابراین هر چه کیفیت سیگنال مورد آشکارسازی بدتر باشد، اثر آن روی آشکارسازی اهداف در سلول‌های برد مجاور نیز بیشتر می‌شود. برای کمی کردن این رفتار در قالب تلفات SNR در ادامه یک سناریوی دو هدفه با مشخصات جدول (۲) را در نظر می‌گیریم. در این شبیه‌سازی یک هدف تحت تست داریم که SNR آن را تغییر می‌دهیم ولی هدف دیگر با مشخصات بیان‌شده در جدول (۲) نیز وجود دارد. به‌طور مثال در ادامه منظورمان از  $S_1 + S_2 + S_3(T_1)$  این است که آشکارساز مورد استفاده سه کاناله با سیگنال‌های  $S_1, S_2, S_3$  است، ولی هدف تحت تست  $T_1$  و هدف تداخلی  $T_2$  است. با توجه به اینکه SNR هدف تحت تست به‌مراتب کمتر از SNR موجود در سناریو است، بنابراین آشکارساز پیشنهادی با احتمال یک هدف تداخلی (هدف قوی) را آشکار و از سناریو حذف می‌کند و در مرحله دوم هدف مورد تست (هدف ضعیف) را آشکارسازی می‌کند. بنابراین با این سناریو می‌توان، اثرات هدف تداخلی (قوی) را در آشکارسازی هدف مورد تست (ضعیف) به‌خوبی بررسی نمود.

جدول ۲: مشخصات سناریوی دو هدفه مورد شبیه‌سازی

| اهداف      |    |      |
|------------|----|------|
| R, km      | ۱۵ | ۱۹/۵ |
| $f_d$ , Hz | ۹۰ | ۹۰   |
| SNR, dB    | -۳ | -۱۰  |

در شکل‌های (۲۰)-(۲۲) به بررسی موضوع فوق در حالتی که از آشکارساز تک کاناله استفاده می‌کنیم پرداخته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تلفات SNR به ازای سیگنال‌های  $S_1, S_2, S_3$  به ترتیب برابر با 0.5dB، 2dB و 5.15dB است که اثر کیفیت سیگنال را در خود دارد. تلفات SNR نیز تفاوت SNR بین دو حالت تک هدفه (هیچ هدف تداخلی وجود ندارد) و دو هدفه به ازای  $P_d = 0.9$  و  $p_{fa} = 10^{-6}$  اندازه‌گیری می‌شود. در شکل (۲۳) موضوع فوق برای



شکل ۱۹: مقایسه احتمال تفکیک در برد در حالت تک کاناله با سیگنال‌های  $S_1, S_2, S_3$  و سه کاناله با ترکیب  $(S_1 + S_2 + S_3)$ .

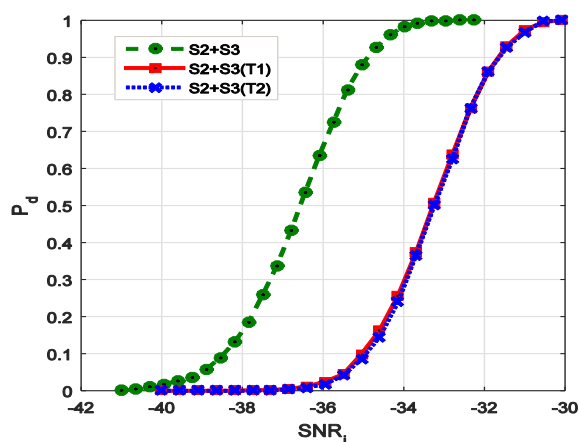
#### ۴-۳- بررسی احتمال تفکیک در حالت چندکاناله

در ادامه برای بررسی دقیق‌تر میزان بهبود در قدرت تفکیک در برد، به‌رسم منحنی‌های احتمال تفکیک دو هدف برحسب فاصله دو هدف خواهیم پرداخت. در این بررسی‌ها انتظار داریم کیفیت سیگنال نیز در بحث بهبود در قدرت تفکیک در برد درگیر شود. برای این بررسی، دو هدف بافاصله  $\Delta R$  با SNR برابر 31dB در نظر گرفته شده است.

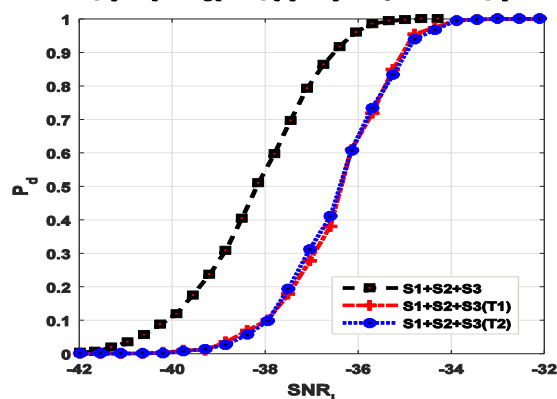
آستانه آشکارساز در این حالت به ازای احتمال هشدار کاذب  $10^{-6}$  تنظیم شده است. در این حالت اگر یکی از اهداف در فرضیه  $(H_1, H_0)$  و دیگری در فرضیه  $(H_2, H_1)$  در محل‌های واقعی خود آشکارسازی شوند، گوییم دو هدف از هم تفکیک پذیرند و در غیر این صورت دو هدف را غیرقابل تفکیک می‌نامیم. برای اندازه‌گیری احتمال تفکیک دو هدف، برنامه را به تعداد ۵۰۰ بار تکرار و تعداد دفعاتی که اهداف تفکیک می‌شوند را بر ۵۰۰ تقسیم می‌کنیم.

در شکل‌های (۱۷)-(۱۹) به بررسی این موضوع پرداخته شده است. در حالت تک کاناله، به ترتیب سیگنال‌های  $S_1, S_2$  و  $S_3$  بهترین تا بدترین قدرت تفکیک در برد را در بین سیگنال‌های مورد بررسی نتیجه می‌دهند که با نتایج شکل (۵) نیز هم‌خوانی (از حیث ترتیب سیگنال‌ها) دارد. ولی از نتایج شکل (۵) این‌طور به نظر می‌رسد که مقدار قدرت تفکیک مربوط به این سه سیگنال تقریباً مشابه است (هرگاه بر اساس معیار پهنای 3dB خروجی آشکارساز قضاوت شوند). ولی نتایج شکل (۱۷) به‌نوعی اثر کیفیت سیگنال (سطح ساید لوب‌ها) را نیز در خود دارد که در این بین سیگنال  $S_3$  ضعیف‌ترین قدرت تفکیک را در بین سایر سیگنال‌ها نتیجه می‌دهد. در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) به بررسی اثر افزایش تعداد کانال‌ها در بهبود قدرت تفکیک پرداخته شده است. همان‌طور که از شکل‌های (۱۸) و (۱۹) نیز مشخص است با افزایش تعداد کانال‌های قدرت تفکیک در حالت کلی بهبود می‌یابد. ولی با مشاهده این دو شکل یک رفتار پیکی در احتمال تفکیک دو هدف مشاهده می‌شود که به‌خوبی اثر کیفیت سیگنال‌های مورد آشکارسازی را نشان می‌دهد. به‌طور مثال نول‌های شکل (۱۹) مربوط به فاصله دو هدف برابر با مضرب صحیحی از 1.5km است که با

شکل ۲۲: منحنی احتمال آشکارسازی برحسب  $SNR_i$  در آشکارساز تک کاناله با سیگنال  $S_3$  به ازای اهداف  $T_1$  و  $T_2$  در سناریوی جدول (۲) و به ازای  $p_{fa} = 10^{-6}$



شکل ۲۳: منحنی احتمال آشکارسازی برحسب  $SNR_i$  در آشکارساز دو کاناله به ازای اهداف  $T_1$  و  $T_2$  در سناریوی جدول (۲) و به ازای  $p_{fa} = 10^{-6}$



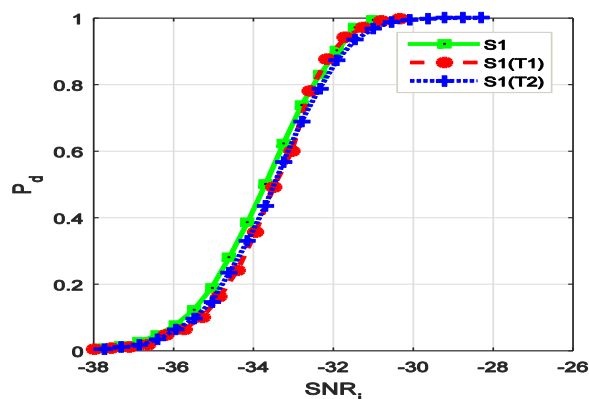
شکل ۲۴: منحنی احتمال آشکارسازی برحسب  $SNR_i$  در آشکارساز سه کاناله به ازای اهداف  $T_1$  و  $T_2$  در سناریوی جدول (۲) و به ازای  $p_{fa} = 10^{-6}$

می‌توان نشان داد که به ازای تعداد کانال‌های فعال یکسان، میزان بهبود قدرت تفکیک روش پیشنهادی با روش پیشنهادی [۱۳] دقیقاً یکسان است. ولی با توجه به اینکه روش آشکارسازی ارائه‌شده در [۱۳] به یک مرحله تأیید نتایج آشکارسازی نیز نیازمند است، حجم محاسباتی آشکارساز پیشنهادی در این مقاله تقریباً نصف حجم محاسباتی روش [۱۱] است. علاوه بر این، از شکل (۳) نیز واضح است که آشکارساز پیشنهادی حجم محاسباتی کمتری به نسبت روش ارائه‌شده در [۱۳]، در پیاده‌سازی بلوک‌های قبل آشکارساز چندکاناله خواهد داشت. می‌توان نشان داد حجم محاسباتی روش پیشنهادی و روش ارائه‌شده در [۱۳] به ترتیب از مرتبه‌های  $C_1 \approx O(NP^2 + 2NPM)$  و  $C_2 \approx O(2NP^2 + 2NPM)$  می‌باشند.

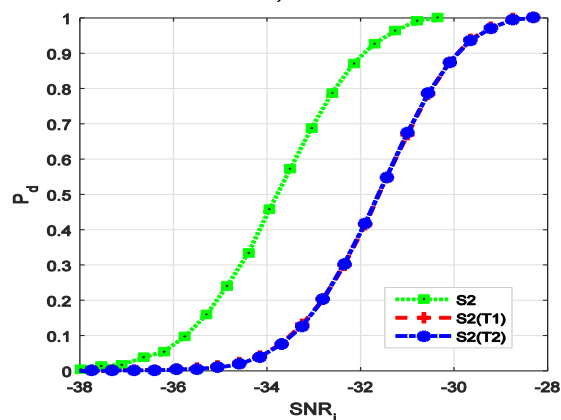
#### ۵- نتیجه‌گیری

برای بهبود قدرت تفکیک برد اهداف در یک رادار پسیو مبتنی بر سیگنال‌های رادیو FM، مسئله آشکارسازی به‌صورت یک مسئله

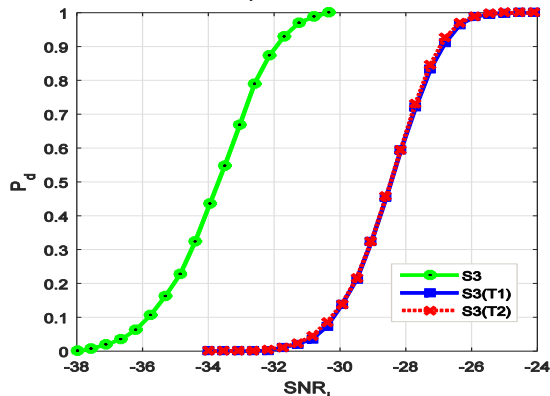
آشکارساز دو کاناله بررسی شده است که تلفات فوق برابر با 3.21dB می‌باشند. همان‌طور که در شکل (۲۴) نشان داده شده است، در حالت سه کاناله نیز تلفات  $SNR$  برابر با 1.5dB خواهد شد. همان‌طور که از نتایج این بررسی مشخص می‌شود، به‌کارگیری آشکارساز چندکاناله می‌تواند تغییرات تلفات آشکارسازی را به نسبت تک کاناله بهبود دهد به‌عبارتی‌دیگر، با به‌کارگیری چندین کانال در آشکارسازی می‌توان متغیر با زمان بودن عملکرد یک رادار پسیو مبتنی بر سیگنال‌های رادیو FM را تا حدی کاهش داد و به‌طور هم‌زمان قدرت تفکیک را نیز بهبود بخشید.



شکل ۲۰: منحنی احتمال آشکارسازی برحسب  $SNR_i$  در آشکارساز تک کاناله با سیگنال  $S_1$  به ازای اهداف  $T_1$  و  $T_2$  در سناریوی جدول (۲) و به ازای  $p_{fa} = 10^{-6}$



شکل ۲۱: منحنی احتمال آشکارسازی برحسب  $SNR_i$  در آشکارساز تک کاناله با سیگنال  $S_2$  به ازای اهداف  $T_1$  و  $T_2$  در سناریوی جدول (۲) و به ازای  $p_{fa} = 10^{-6}$



- [4] A. Zaimbashi, "Target Detection in Analogue Terrestrial TV-based Passive Radar Sensor": Joint Delay-Doppler Estimation, *IEEE Sensors Journal*, 17, 17, 5569 - 5580, 2017.
- [5] A. Zaimbashi, M. Derakhtian, A., Sheikhi, "GLRT-Based CFAR Detection in Passive Bistatic Radar", *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 49, 1, 134-159, 2013.
- [6] A. Zaimbashi, "Forward M-ary Hypothesis Testing Based Detection Approach for Passive Radar", *IEEE Trans. on Signal Processing*, 65, 10, 2659-2671, 2017.
- [7] M. Radmard, SM. Karbasi, MM. Nayebi, "Data fusion in MIMO DVB-T-based passive coherent location", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 49 (3), 1725-1737.
- [8] D. Poullin, "Passive detection using broadcasters (DAB, DVB) with CODFM modulation", *IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation*, 152, 3(June 2005), 143-152.
- [9] D., Tan, H., Sun, Lui, M., Y., Lesturgie, and H. Chan.: "Passive radar using global system for mobile"
- [10] communication signal: Theory, implementation and measurements', *IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation*, 152, 3(June 2005), 116-123.
- [11] A. Evers, and J.A Jackson,: "Cross-ambiguity characterization of communication waveform features for passive radar", *IEEE Trans.on Aerospace and Electronic Systems*, 51, 4(October 2015), 3440-3455.
- [12] A. Zaimbashi, M. Derakhtian, A., Sheikhi, "Invariant Target Detection in Multiband FM-Based Passive Bistatic Radar", *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 50, 1, 720-736, 2014
- [13] A., Zaimbashi, "Multiband FM-Based Passive Bistatic Radar: Target Range Resolution Improvement, " *IET Radar, Sonar & Navigation*, 10, 1, 174 – 185, 2016.
- [14] A. Zaimbashi, "Broadband Target Detection Algorithm in FM-Based Passive Bistatic Radar Systems", *IET Radar, Sonar & Navigation*, 10, 8, 1485 – 1499, 2016.
- [15] A. Zaimbashi, A. Sheikhi, M. Derakhtian, "Evaluation of Detection Performance of Passive Bistatic Radar Detectors based on Commercial FM Radio Signals", *Journal of "Radar"*, 1, 2, 23-34, 2014.
- [16] K. Olsen, "FM-based passive bistatic radar as a function of available bandwidth", *RadarConference, 2008. RADAR'08. IEEE, 2008.*
- [17] K. E. Olsen, , and C. J. Baker, "FM-based passive bistatic radar as a function of available bandwidth", *IEEE 2008 Radar Conference, (May 2008), CD-ROM.*
- [18] A. S., Tasdelen, and H., K'oymen, "Range resolution improvement in passive coherent location radar systems using multiple FM radio channels", in *Proc. IET Forum on Radar and Sonar*,(Nov. 2006), 23-31
- [19] A. Zaimbashi, "Target detection in FM-Based Passive Radars in the presence of interference signals in reference channel", *Journal of "Radar"*, 10, 2, 1-15, 2016.
- آزمون-فرض Mتایی (با M دلخواه) مدل‌سازی و مسئله آشکارسازی توسط روش GLR مرحله-به-مرحله حل گردید. در این مقاله به‌جای استفاده از کانال‌های پراکنده ارسالی یک فرستنده رادیو FM، از سیگنال‌های کانال‌های مجاور استفاده گردید تا دیگر نیازی به بحث جبران‌سازی داپلرهای مختلف دریافتی از کانال‌های مختلف نباشد. بر این اساس با توجه به کیفیت متفاوت سیگنال‌های کانال مختلف، سناریوهای متعددی برای بررسی عملکرد آشکارساز پیشنهادی طرح‌ریزی شد. نتایج بیانگر این موضوع بودند که قدرت تفکیک در برد به کیفیت سیگنال‌های مورد آشکارسازی وابسته است ولی با افزایش تعداد کانال‌ها قدرت تفکیک بهبود می‌یابد. علاوه بر این مشاهده کردیم، عملکرد آشکارسازی نیز در سناریوهای چنددهنده بسیار متأثر از کیفیت سیگنال‌های مورد استفاده در کانال‌های مختلف است. علاوه بر این مشاهده کردیم با افزایش تعداد کانال‌های آشکارسازی میزان متغیر با زمان بودن عملکرد یک رادار پسیو مبتنی بر سیگنال‌های رادیو FM می‌تواند کاهش یابد و بهره ترکیب متناسب با تعداد کانال‌ها افزایش می‌یابد که اولی قابلیت اطمینان سیستم راداری را افزایش می‌دهد و دومی منجر به افزایش برد سیستم می‌گردد.

## مراجع

- [1] R. Alex, C., Bryan Paul, and D. W. Bliss, "Radar-Communications Convergence: Coexistence, Cooperation, and Co-Design", *IEEE Trans. on Cognitive Communications and Networking*, 3, 1, March 2017.
- [۲] ابراهیم، باقری، محمدحسین کهایی، محمدجباریان و علی‌اصغر بهشتی شیرازی، «طراحی شکل موج ارسالی رادار به‌منظور بالا بردن دقت تخمین تأخیر و فرکانس داپلر هدف با معیار CRB»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، ۳، ۴۶، ۵۱-۵۸، ۲۰۱۶.
- [۳] فرهاد. دانایی یگانه و افشین. ابراهیمی، «مدیریت انتخاب مجدد سلول در نسل‌های مختلف شبکه‌های سلولی مبتنی بر ۳ GPP و تحلیل دو چالش یک اپراتور داخلی» *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، ۳، ۴۶، ۱۶۱-۱۷۹، ۲۰۱۶.

## زیرنویس‌ها

- <sup>1</sup>Analog Tv  
<sup>2</sup>Frequency Modulation  
<sup>3</sup>Digital Video Broadcasting Terrestrial  
<sup>4</sup>Digital Audio Broadcasting  
<sup>5</sup>Global System for Mobile Communication  
<sup>6</sup>Long Term Evolution  
<sup>7</sup>Generalized Likelihood Ratio Test  
<sup>8</sup>Carrier  
<sup>9</sup>Integration Time  
<sup>10</sup>Multipath\clutter  
<sup>11</sup>Span  
<sup>12</sup>Fast Fourier Transformation  
<sup>13</sup>Chirp-Z -Transform  
<sup>14</sup>Peak to Sidelobe Level Ratio  
<sup>15</sup>Signal-to-noise Ratio

<sup>16</sup>Combination Gain