

Targeted Group Jamming Against Radar Systems

H. Alimohammady*, M. Soleimani, H. Soleimani 

*Assistant Professor, University of Science and Technology, Tehran, Iran
Received: 2024 /07/02, Revised: 2024/09/09, Accepted: 2024/09/27, Published: 2024/10/22

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23224347.1403.12.3.9.1>

ABSTRACT

In this article, first, the significance of group jamming is stated. The jamming resources can be classified as follows: time, space, power, displacement, bandwidth, jamming pattern, number, switching, and beam forming. Next, some examples from the work background are presented, followed by an overview of the key components of the group jamming algorithm. In the explanation of the main components of the group jamming algorithm, there are eight types of indicators that are considered and explained. These indicators are used to evaluate the effectiveness of the jamming. Among these indicators, the issue of reducing radar detection has been considered a criterion for evaluating jamming effectiveness. The group jamming approach proposes and solves two scenarios using the auction algorithm. The first proposed scenario involves insufficient data on radar locations, and the subsequent solution is mathematically analyzed and discussed. In the second scenario, we include the assumption of not knowing the precise working frequency of the systems. This additional assumption modifies the mathematical relationships under the new conditions. Finally, the simulation results and topic summary are presented. Using the proposed principles, it is feasible to design and evaluate various assumptions and scenarios of group jamming.

Keywords: : Group Jamming, Resource Assignment, Radar Systems

* Corresponding Author Email: hsoleimani@iust.ac.ir

علمی - پژوهشی

اخلال گروهی هدفمند در برابر سیستم‌های راداری

حمزه علی محمدی^۱، محمد سلیمانی^۲، حسین سلیمانی^۳

۱- دانشجوی دکتری ۲- استاد ۳- استادیار دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۲، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۱۹، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۰۶، انتشار: ۱۴۰۳/۰۸/۰۱)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23224347.1403.12.3.9.1>

* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز (CC BY) Creative Commons توزیع شده است.



ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع) نویسندگان

چکیده

مدیریت صحنه نبرد با استفاده هدفمند از منابع ۱ اخلال از اهمیت بالایی برخوردار است. در این راستا منابع اخلال را می‌توان به مواردی همچون زمان، فضا، توان، جابه‌جایی، پهنای باند، الگوی اخلال، تعداد، سوئیچینگ و شکل‌دهی پرتو دسته‌بندی نمود. در مقاله حاضر ابتدا نمونه‌هایی از مدیریت منابع اخلال مطرح می‌گردد و پس از آن، به بیان اجزای الگوریتم اخلال گروهی موردنظر می‌پردازیم. در حاشیه تبیین اجزای الگوریتم اخلال گروهی، هشت نوع شاخص مختلف جهت ارزیابی میزان اثربخشی اخلال مورد توجه و تبیین قرار می‌گیرد. از میان این شاخص‌ها، موضوع کاهش سطح آشکارسازی رادارها به‌عنوان معیار ارزیابی میزان اثربخشی اخلال در نظر گرفته شده است. سپس باتوجه‌به رویکرد اخلال گروهی، دو سناریو پیشنهاد و با استفاده از الگوریتم مزایده^۲ حل می‌گردد. سناریوی پیشنهادی اول، عدم اطلاع دقیق از مکان استقرار رادارها می‌باشد که راهکار مقابله با چالش مذکور موردبحث و تحلیل ریاضی قرار می‌گیرد. در سناریوی پیشنهادی دوم، فرض عدم اطلاع دقیق از فرکانس کاری رادارها نیز به فرض قبلی اضافه شده و روابط ریاضی در شرایط جدید باز تعریف می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که باتوجه‌به فرضیات اختصاصی هر نمونه تحت شبیه‌سازی، الگوریتم به‌صورت کامل طبق انتظار عمل نموده و هر جمر مطابق با ظرفیت اخلالی خود نزدیک‌ترین رادارها را برای اخلال انتخاب نموده است. در هر صورت با استفاده از مبانی مطرحه، می‌توان فرضیات و سناریوهای اخلال گروهی متنوعی را مورد طراحی و ارزیابی قرارداد.

کلیدواژه‌ها: اخلال گروهی، تخصیص منابع، سیستم‌های راداری

۱- مقدمه

بی‌تردید فرماندهی و کنترل کارآمد در یک صحنه نبرد الکترونیکی از عوامل مهم و اثرگذار در موفقیت عملیات به شمار می‌آید. پس از طراحی و تولید انواع سامانه‌های اخلال، نحوه به‌کارگیری مؤثر آن‌ها در یک شرایط عملیاتی پیچیده شامل تعداد زیادی رادار حائز اهمیت است. در صورت استفاده نامناسب و غیربهینه از منابع اخلال، علاوه بر هدررفت منابع و اثرگذاری اندک در صحنه نبرد، به دلیل ایجاد تشعشع مدیریت نشده در محیط، احتمال قرارگرفتن سامانه‌های جمری در تیررس سیستم‌های ضد تشعشع طرف مقابل بالا می‌رود.

بنابراین، باهدف مدیریت مناسب صحنه نبرد الکترونیکی و همچنین هم‌افزایی و همگرایی جمرها در اخلال سیستم‌های راداری، موضوع اخلال گروهی هدفمند در این مقاله مورد توجه

است. اخلال چند جمری هدفمند در مجموعه رادارهای حاضر در صحنه نبرد، می‌تواند با در نظر گرفتن دو اصل ذیل همراه باشد.

اصل اول: بهینه‌سازی اثربخشی اخلال

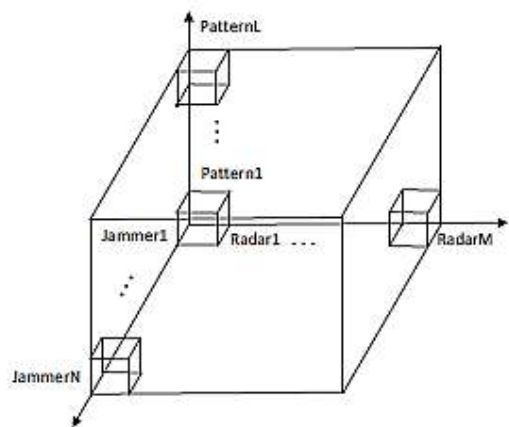
به‌کارگیری یک مجموعه جمری شامل جمرهایی با مشخصات و قابلیت‌های متنوع، در یک سناریوی اخلال گروهی هدفمند نسبت به یک سناریوی تک جمری محدود، اثربخشی بالاتری خواهد داشت. همچنین برخی صحنه‌های نبرد الکترونیکی، ممکن است شامل شبکه‌ها یا تعداد زیادی رادار باشند که در این صورت، اخلال تک جمری کاری از پیش نخواهد برد و نیاز به سامان‌دهی تعداد کافی جمر وجود دارد

اصل دوم: استفاده بهینه از منابع اخلال

استفاده بهینه از منابع اخلال را می‌توان از دو منظر حائز اهمیت دانست که عبارت‌اند از:

* رایانامه نویسنده مسئول: zarepourjamal@yazd.ac.ir

¹ Resources² Auction



شکل (۲) مدل تخصیص مبتنی بر همپوشانی فضایی و الگوی اختلال [۵]

لازم به ذکر است که تلاش‌های تحقیقاتی متنوعی در راستای موضوع مورد بحث دیده می‌شود. به عنوان نمونه در هر دو مرجع [۵، ۶] از الگوی اختلال و همپوشانی فضایی به عنوان منابع اختلال استفاده شده است. در مرجع [۵] با در نظر گرفتن یک معیار ارزیابی ترکیبی مبتنی بر احتمال آشکارسازی و دقت موقعیت‌یابی شبکه راداری، میزان اثربخشی اختلال گروهی مورد سنجش قرار گرفته است. مرجع مذکور از روش ترکیبی بهینه‌سازی ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیکی جهت حل مسئله استفاده نموده است. در مرجع [۶] که از معیار احتمال آشکارسازی شبکه راداری برای سنجش میزان اثربخشی اختلال گروهی استفاده می‌نماید، برای حل مسئله از یک روش ترکیبی مبتنی بر PSO^5 و GA^6 استفاده نموده است.

در مرجع [۷] اختلال گروهی در برابر رادارهای $MIMO^7$ توزیع شده مورد بررسی قرار گرفته است. این نوع رادارها به دلیل بهبود عملکرد آشکارسازی و تخمین و نیز ارتقاء قابلیت $ECCM^8$ مورد توجه هستند. معیار ارزیابی اثربخشی اختلال گروهی در برابر سیستم راداری مورد نظر، کران خطای تخمین کرامر-رائو در نظر گرفته شده است. در مرجع مذکور سناریو اختلال مورد استفاده به صورت خود محافظتی می‌باشد و جمر می‌تواند با استفاده از فناوری آرایه فازی فعال، به صورت همزمان به چندین جهت تشعشع داشته باشد. در اینجا فرض بر این است که اطلاعات قبلی از مکان گره‌های راداری و سایر اطلاعات مورد نیاز برای محاسبات CRB^9 توسط سیستم‌های شناسایی^{۱۰} منصوب بر وسیله^{۱۱} یا آژانس‌های اطلاعاتی^{۱۲} در دسترس است. در اینجا

منابع اختلال توسط ادوات ضد تشعشع همچون موشک‌های ARM^1 (ب) جلوگیری از هدررفت منابع و استهلاک جمرها

تأمین دو اصل فوق در یک صحنه نبرد پیچیده شامل چندین جمر خودی و چندین رادار هدف، از طریق مدیریت صحیح منابع اختلال و ایجاد یک سازوکار مناسب جهت تخصیص بهینه جمرها به رادارها صورت خواهد گرفت. پس موضوع اصلی بر سر منابع^۲ است که در یک دسته‌بندی کلی، منابع موجود در حوزه اختلال گروهی راداری را می‌توان به نه دسته ذیل تقسیم نمود:

۱- زمان (شامل مدت زمان روشن بودن هر منبع^۳ و فاصله زمانی بین روشن و خاموش شدن هر منبع^۴) [۱]
۲- فضا [۲] (تمرکز پرتو آنتن جمر بر روی یک یا چند رادار مشخص (همپوشانی فضایی))

۳- توان [۳]

۴- جابه‌جایی (کاهش یا افزایش فاصله جمر تا رادار ناشی از تحرک جمرها)

۵- پهنای باند فرکانسی (میزان همپوشانی فرکانسی)

۶- الگوی اختلال (به کارگیری انواع اختلال اعم از نویزی و فریب)

۷- تعداد (چند جمر درگیر عملیات اختلال استفاده شوند)

۸- سوئیچینگ (کدامیک از جمرها فعال باشند یا اینکه سوئیچ زنی بین جمرها وجود داشته باشد [۴])

۹- شکل‌دهی پرتو آنتن

منابع در دسترس جهت اختلال گروهی در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱) منابع در دسترس جهت اختلال گروهی

مدلی از تخصیص منابع اختلال گروهی در شکل (۲) نشان داده شده است. همانگونه که در شکل مذکور ملاحظه می‌گردد از بین نه منبع در دسترس فوق، تمرکز بر روی بندهای دو و شش یعنی همپوشانی فضایی و الگوی اختلال می‌باشد. در این مدل مشخص می‌شود که برای افزایش اثربخشی، کدام جمر با کدام الگوی اختلال به کدامین رادار اختصاص پیدا کند.

⁵ Particle Swarm Optimization

⁶ Genetic Algorithm

⁷ Multiple Input Multiple Output

⁸ Electronic Counter-Counter Measures

⁹ Cramer-Rao Bound

¹⁰ Reconnaissance

¹¹ On-Board

¹² Intelligence Agencies

¹ Anti Radiation Missile

² Resources

³ dwell time

⁴ revisit interval

سیگنال های دریافتی از ایستگاه های راداری متفاوت در $MSRS^9$ آسیب می زند که این امر به صورت قابل توجهی عملکرد حذف^{۱۰} اخلاص توسط رادار مالتی استاتیک را کاهش می دهد. در روش مذکور احتمال انتخاب جمرها یکسان در نظر گرفته می شود که اثبات شده است چنانچه احتمال انتخاب جمرها پنجاه درصد باشد، بیشترین میزان اخلاص حاصل می شود.

در مرجع مذکور باهدف افزایش اثر اخلاص گروهی بر روی سیستم راداری مالتی استاتیک، پیشنهاد می شود که جمرها همچنان به صورت تصادفی انتخاب شوند؛ اما نه با احتمالات یکسان، بلکه مقادیر احتمالاتی که منجر به بیشترین میزان اثرگذاری بر روی سیستم می شود، ذیل یک مسئله بهینه سازی به دست آیند. نتایج نشان می دهند که روش مذکور منجر به ورود سهم بیشتری از انرژی تشعشعی جمرها در سیستم راداری مالتی استاتیک مجهز به تخمین سیگنال اخلاص به روش وفقی می شود. مقاله حاضر شامل دو هدف اصلی است. هدف نخست عبارت است از مروری بر برخی ادبیات و منابع اخلاص گروهی و هدف دوم بیان سناریو اخلاص گروهی پیشنهادی و شبیه سازی آن است. در ادامه اجزای الگوریتم اخلاص گروهی در بخش دوم ذکر می گردد. پس از آن الگوریتم اخلاص گروهی هدفمند مبتنی بر مزایده [۹] به همراه سناریوهای پیشنهادی در بخش سوم ذکر خواهد شد، سپس ارائه نتایج شبیه سازی در بخش چهارم و در نهایت جمع بندی مباحث در بخش پنجم ارائه خواهد شد.

۲- اجزای الگوریتم اخلاص گروهی هدفمند

در این بخش ابتدا اجزای الگوریتم اخلاص گروهی هدفمند موردنظر معرفی می گردد. سپس هر یک از اجزاء به صورت جداگانه تشریح می گردد. در خلال بحث نیز، انواع روش های ارزیابی اثر اخلاص تبیین می شود.

در یک نگاه کلی اجزای مسئله اخلاص گروهی را می توان در هفت بخش ذیل خلاصه نمود:

- ۱- تعیین ضرایب تهدید رادارها
- ۲- تشکیل ماتریس اثربخشی^{۱۱}
- ۳- تعیین تابع منفعت^{۱۲}
- ۴- تعیین قیود مسئله
- ۵- انتخاب استراتژی حل مسئله
- ۶- تشکیل ماتریس تخصیص^{۱۳}
- ۷- تعیین فرضیات مسئله

در ادامه توضیحاتی پیرامون هر یک از موارد هفت گانه فوق ارائه

صورت مسئله این است که توان تشعشعی جمرها در جهت گره های گیرنده سیستم راداری MIMO توزیع شده چه میزان باشد که کران خطای تخمین CRB به بیشینه مقدار ممکن برسد. به دلیل آنکه عبارت های به دست آمده برای CRB غیر محذب هستند، نویسندگان از الگوریتم ابتکاری^۱ PSO برای حل مسئله بهینه سازی استفاده نموده اند.

در مرجع مذکور جهت ایجاد امکان مقایسه روش بهینه سازی پیشنهادی، سه روش دیگر جهت تعیین میزان توان تشعشعی جمر در جهات مختلف، در نظر گرفته شده است. در روش "یکنواخت"^۲ توان تشعشعی جمر در تمام جهات یکسان است. در روش "متمرکز"^۳ کل توان جمر بر روی یک گیرنده متمرکز شده است. در روش "تصادفی"^۴ نیز توان جمر به صورت تصادفی در جهات مختلف توزیع می شود. نشان داده می شود که روش پیشنهادی نسبت به سه روش دیگر، بیشترین اثر تخریبی را بر روی سطح کران CRB به ازای واریانس های مختلف اخلاص داشته است.

در مرجع [۸] با فرض امکان قرار دادن جمرها در نقاط مناسب، مسئله جایابی^۵ جمرها مورد توجه قرار گرفته است. در یک سناریو شامل چندین رادار و چندین جمر، با تعیین اهدافی همچون کاهش ناحیه آشکارسازی رادارها می توان مکان مناسب جمرها را به دست آورد. در مرجع مذکور سه تابع هدف تعریف شده است که عبارتند از: کاهش ناحیه آشکارسازی رادارها، جلوگیری از هدر رفت منابع تشعشعی اخلاص و نیز ایجاد عریض ترین کریدور امن بین رادارهای دشمن. واضح است که با توجه به حضور سه تابع هدف، صورت مسئله به شکل یک مسئله بهینه سازی چند هدفه^۶ در می آید که برای حل آن از الگوریتم بهینه سازی چند هدفه پروانه-شعله^۷ استفاده شده است.

در مرجع [۴] اخلاص گروهی در برابر یک سیستم راداری چندپایه^۸ مورد بررسی قرار گرفته است. در روش مرسوم اخلاص شبکه ای در برابر سیستم راداری مالتی استاتیک، تمام جمرها در ایجاد اخلاص مشارکت می کنند. اخیرا روشی پیشنهاد شده است که به جای دخالت دادن تمام جمرها در فرآیند اخلاص گروهی، برخی جمرها به صورت تصادفی برای تشعشع سیگنال اخلاص انتخاب می شوند که این کار سبب پیدایش پرتو فرعی تصادفی می شود. لوب فرعی تصادفی ایجاد شده به همدوسی بین

¹Heuristic

²Uniform

³Concentrated

⁴Random

⁵Placement

⁶multi-objective optimization

⁷Moth-Flame

⁸Multistatic

⁹ Multistatic Radar System

¹⁰ Suppression

¹¹ Benefit Matrix

¹² Benefit Function

¹³ Decision Matrix

۲-۱-۲ تابع وزن یافته از احتمال آشکارسازی و دقت موقعیت یابی GDOP شبکه راداری [۶]

فاکتور کلیدی اثرگذار در احتمال آشکارسازی رادار، نسبت سیگنال به جمر SJR است؛ بنابراین پیش از بیان رابطه احتمال آشکارسازی، رابطه SJR بیان می گردد. در شرایط اخلاخل گروهی با فرض اینکه سیگنال های اخلاخل مستقل از یکدیگر باشند، SJR اکوی هدف رادار m ام که تحت اخلاخل N جمر قرار دارد، عبارت خواهد بود از:

$$(1)$$

$$SJR = \frac{P_{is}}{P_{js}} = \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^N \frac{P_t G_t \sigma_j L_j R_{jr}^2}{P_j G_j L_s R_{jr}^4 E_{jlr}}$$

که در رابطه (۱)، P_t توان ارسالی رادار، G_t بهره ارسالی آنتن رادار، σ سطح مقطع راداری هدف، L_s افت تجمیعی رادار، R_{jr} فاصله از رادار تا هدف، P_j توان ارسالی جمر، G_j بهره آنتن جمر، γ_j فاکتور عدم تطابق پلاریزاسیون، L_j افت تجمیعی جمر، R_{jr} فاصله بین جمر و رادار و در نهایت فاکتور E_{jlr} مربوط به اثر الگوی اخلاخل جمر بر روی رادار است. جزئیات فاکتور E_{jlr} در مراجع [۵، ۶، ۱۱] قابل پیگیری است.

با فرض اینکه رادار m ام شامل N واحد آشکارسازی باشد، در این صورت احتمال آشکارسازی آن در هر موقعیت از فضا عبارت است از [۱۲]:

$$P_{dm} = \left(1 + \frac{\alpha}{N(1+SJR)} \right)^{-N} \quad (2)$$

که آستانه α به صورت رابطه (۳) می باشد.

$$\alpha = N(P_{fa}^{-1/N} - 1) \quad (3)$$

در رابطه (۳) نیز P_{fa} احتمال هشدار غلط می باشد. لذا طبق مرجع [۵] برای مشاهده اثر اخلاخل بر روی شبکه راداری، رابطه (۴) قابل ذکر است.

$$P_d = 1 - \prod_{m=1}^M (1 - P_{dm}) \quad (4)$$

اما می دانیم احتمال آشکارسازی شبکه راداری بدون هیچ گونه تداخل الکترونیکی $\hat{P}_d(SNR)$ است. بنابراین اثربخشی اخلاخل جمرها بر روی شبکه راداری با شاخص احتمال آشکارسازی می تواند به صورت رابطه (۵) کمی شود.

$$y_1 = \left| \frac{\hat{P}_d(SNR) - P_d(SJR)}{\hat{P}_d(SNR)} \right| \quad (5)$$

از سوی دیگر اثربخشی اخلاخل جمرها بر روی شبکه راداری با شاخص دقت موقعیت یابی GDOP نیز می تواند به صورت رابطه

می گردد. لازم به ذکر است که اولاً علاوه بر مواد فوق ممکن است موارد دیگری نیز وجود داشته باشد، ثانیاً کلیه روش های اخلاخل گروهی مطروحه در منابع مختلف، لزوماً شامل تمامی موارد فوق نمی باشند.

۲-۱-۲ تعیین ضرایب تهدید رادارها

ارائه الگوریتم اخلاخل گروهی در برابر سیستم های راداری، دارای مراحل است که یکی از مراحل آن می تواند تعیین میزان تهدید یا اهمیت هر رادار حاضر در مجموعه راداری باشد. هر چه اطلاعات از مشخصات رادارهای موردنظر بیشتر باشد، سطح تهدید تعیین شده به واقعیت نزدیک تر خواهد بود. یکی از چالش های مسئله، ناآگاهی نسبت به موقعیت [۱۰] و همچنین سایر مشخصات رادارهای مورد نظر همچون نوع رادار، باند فرکانسی، توان ارسالی، الگوی چرخش آنتن، مد کاری، استقرار یا تاکتیکی بودن پلت فرم و مشخصاتی از این قبیل می باشد.

یک روش حل چالش عدم اطلاع نسبت به مشخصات مورد نیاز از رادارهای قربانی، به سبک مرجع [۷] می تواند باشد. در این مرجع فرض بر این است که از قبل برخی اطلاعات همچون مکان گره ها به وسیله سیستم های شناسایی^۱ منصوب بر وسیله^۲ یا آژانس های اطلاعاتی^۳ در دسترس هستند.

۲-۲ تشکیل ماتریس اثربخشی

جهت ارزیابی راندمان اخلاخل گروهی لازم است اثر حاصل از تخصیص هر جمر به هر رادار محاسبه شود. سپس با استفاده از مقادیر به دست آمده به عنوان درایه های یک ماتریس $M \times N$ (M تعداد جمرها و N تعداد رادارها)، ماتریس اثربخشی تشکیل گردد. در ادامه هشت روش برای محاسبه اثر اخلاخل جمر بر رادار معرفی می گردد که به طور خلاصه عبارت اند از:

- ۱- تابع وزن یافته از احتمال آشکارسازی و دقت موقعیت یابی GDOP^۴ شبکه راداری
- ۲- میزان همپوشانی منابع اخلاخل با مشخصات رادار قربانی (هم پوشانی فضایی، زمانی، فرکانسی و غیره)
- ۳- کران خطای کرامر-رائو (CRB^۵)
- ۴- برد سوختن ($R_{Burn-Through}$)
- ۵- سوختن سیگنال در حضور اخلاخل از دید سطح مقطع راداری ($\sigma_{Burn-Through}$)
- ۶- نسبت انرژی اخلاخل خروجی به ورودی
- ۷- درصد کاهش برد آشکارسازی رادار
- ۸- زمان متوسط برای از دست رفتن قفل (حلقه ردیابی) MTLL^۶

¹ Reconnaissance

² On-board

³ Intelligence Agencies

⁴ Geometric Dilution of Precision

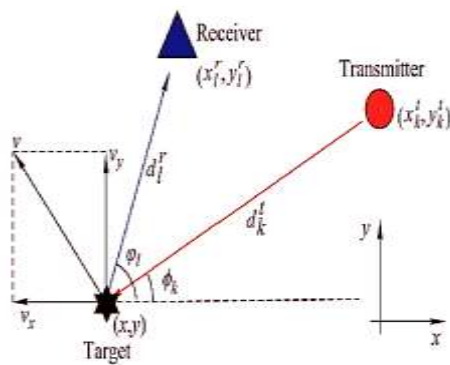
⁵ Cramer-Rao Bound

⁶ Mean Time to Loss Lock

جمعه های خودی باید بتوانند دقت تخمین پارامترهای هدف نظیر مکان یا سرعت را که توسط رادار مذکور تخمین زده می شود، کمینه نمایند.

همان گونه که می دانیم کران پایین خطای کرانر - رانو^۴، از منظر واریانس بهترین عملکرد مورد انتظار یک تخمین گر را مشخص می نماید؛ بنابراین با بیشینه سازی کران خطای کرانر - رانو توسط شبکه ای از جمعه ها، بهترین عملکرد مورد انتظار تخمین گر دستخوش تغییرات نامطلوب شده و خطای تخمین رادار افزایش می یابد.

در شکل (۳) موقعیت آنتن فرستنده k ام (x_k^t, y_k^t) و آنتن گیرنده l ام (x_l^r, y_l^r) رادار MIMO توزیع شده و نیز موقعیت هدف (x, y) و همچنین مؤلفه های افقی و عمودی بردار سرعت هدف (v_x, v_y) قابل ملاحظه هستند.



شکل (۳) هندسه رادار و هدف

در فرض حاضر پارامترهای نامعلومی که رادار MIMO توزیع شده تخمین می زند عبارت اند از:

$$\mathbf{p} = [x, y, v_x, v_y]^T \quad (10)$$

که ماتریس معکوس $\mathbf{FIM}^5$ بردار $\mathbf{p}$ عبارت است از:

$$\mathbf{C}_p = [\mathbf{H}(\mathbf{S} - \mathbf{V}\mathbf{\Lambda}^{-1}\mathbf{V}^T)\mathbf{H}^T]^{-1} \quad (11)$$

که عناصر قطری ماتریس $\mathbf{FIM}^{-1}$ ، به ترتیب CRB متغیرهای متناظر هستند؛ یعنی:

$$\begin{aligned} \text{CRB}_x &= [\mathbf{C}_p]_{1,1} \\ \text{CRB}_y &= [\mathbf{C}_p]_{2,2} \\ \text{CRB}_{v_x} &= [\mathbf{C}_p]_{3,3} \\ \text{CRB}_{v_y} &= [\mathbf{C}_p]_{4,4} \end{aligned} \quad (12)$$

تعاریف ماتریس های $\mathbf{S}$ ، $\mathbf{V}$ ، $\mathbf{\Lambda}$ و $\mathbf{H}$ از مرجع [۷] قابل پیگیری است.

هنگامی که یک مدل آماری بیش از یک پارامتر تخمین دارد،

(۶) کمی شود.

$$y_2 = \frac{P_g(\text{SJR}) - \hat{P}_g(\text{SNR})}{\hat{P}_g(\text{SNR})} \quad (6)$$

که در رابطه (۶)، $P_g(\text{SJR})$ دقت موقعیت یابی GDOP رادار

در محیط اخلاص و $\hat{P}_g(\text{SNR})$ دقت موقعیت یابی GDOP رادار در محیط فاقد اخلاص بوده که جزئیات بیشتر رابطه (۶) در مرجع [۵] قابل ملاحظه است.

بنابراین، تابع وزن یافته از احتمال آشکارسازی و دقت موقعیت یابی GDOP شبکه راداری به صورت $\lambda_1 y_1 + \lambda_2 y_2$ تعریف می گردد که داریم:

$$\sum_{i=1}^2 \lambda_i = 1 \quad (7)$$

۲-۲-۲ میزان هم پوشانی منابع اخلاص با مشخصات رادار قربانی (هم پوشانی فضایی، زمانی، فرکانسی و غیره) [۱۳]

همان گونه که می دانیم جمر باید نسبت به رادار دارای هم پوشانی دقیق زمانی، فرکانسی، پوشش فضایی، توان مناسب و تطابق الگو باشد؛ از این رو اثر اخلاص را می توان از منظر زمان، فرکانس، فضا، انرژی، الگوی اخلاص و نوع توانمندی ضد اخلاص رادار مورد ملاحظه قرارداد.

با فرض وجود M جمر و N رادار، راندمان اخلاص جمر i ام ($i = 1, \dots, M$) بر روی رادار j ام ($j = 1, \dots, N$) عبارت است از:

$$e_{ij} = \beta_1 I_{tij} + \beta_2 I_{fij} + \beta_3 I_{pij} + \beta_4 I_{mij} + \beta_5 I_{aij} \quad (8)$$

که در رابطه (۸)، I_{tij} فاکتور زمان اخلاص، I_{fij} فاکتور فرکانس اخلاص، I_{pij} فاکتور توان اخلاص، I_{mij} فاکتور الگوی اخلاص و I_{aij} فاکتور ضد اخلاص رادار می باشد؛ $\beta_1, \dots, \beta_5$ نیز مقادیر وزن هر فاکتور است و داریم

$$\sum_{k=1}^5 \beta_k = 1 \quad (9)$$

۳-۲-۲ کران خطای کرانر - رانو $(\text{CRB})^1$ [۷]

با فرض اینکه تخمین گر یک رادار MIMO توزیع شده^۲ باشد، وجود چندین آنتن با فاصله از هم در هر دو طرف ارسال و دریافت، رزولوشن بالاتری از مکان و تخمین بهتری از پارامترهای هدف را نتیجه می دهد. به خصوص اینکه این تنوع فضایی^۳، قابلیت ECCM رادار را به طور چشمگیری ارتقاء داده و تهدیدی برای اثربخشی ادوات جنگ الکترونیک کنونی به شمار می آید؛ بنابراین

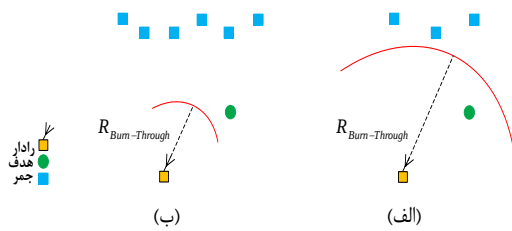
¹ Cramer-Rao Bound

² distributed Multiple Input Multiple Output

³ spatial diversity

⁴ Cramer-Rao Lower Bound

⁵ Fisher Information Matrix



شکل (۴). نمایی از مفهوم $R_{Burn-Through}$

همان‌گونه که در شکل (۴) ملاحظه می‌گردد در قسمت (الف) تعداد سه جمر و در قسمت (ب) شش جمر جهت ایجاد اختلال در رادار استفاده شده است که در نتیجه این افزایش تعداد جمر، کاهش در $R_{Burn-Through}$ حاصل شده است. لازم به ذکر است که می‌توان بدون افزایش تعداد جمر و صرفاً با کاهش فاصله جمرها تا رادار و یا فاکتورهای دیگری همچون افزایش توان جمرها نیز کاهش در $R_{Burn-Through}$ را ایجاد نمود.

رابطه $R_{Burn-Through}$ که وابسته به نسبت SJR^5 است، عبارت است از:

$$R_{Burn-Through} = \left(\frac{P_t G_t}{P_j G_j} \frac{\sigma R_j^2}{4\pi} \frac{B_j}{B_t} \frac{PCR}{K_j} \frac{N_p}{L_s} \frac{L_j}{S} \right)^{1/4} \quad (14)$$

که در رابطه (۱۴) P_j توان جمر به وات، P_t پیک توان ارسالی رادار به وات، G_j بهره آنتن جمر، G_t بهره آنتن ارسالی، B_j پهنای باند جمر، B_t پهنای باند رادار، R_j فاصله جمر تا رادار، σ سطح مقطع راداری هدف، L_j افت جمر، L_s افت سیگنال در رادار، J توان جمر در آنتن رادار (لوب اصلی)، S توان سیگنال در آنتن رادار، K_j بهره شکل موج جمر در پردازشگر رادار، PCR نسبت فشرده‌سازی پالس و N_p تعداد پالس‌های تجمیع شده (بهره FFT) می‌باشد.

۲-۵ سوختن سیگنال در حضور اختلال از دید سطح

مقطع راداری ($\sigma_{Burn-Through}$) [۱۷]

با استفاده از مفهوم سوختن سیگنال در حضور اختلال^۶، شاخص ارزیابی اثر اختلال را می‌توان به‌عنوان $\sigma_{Burn-Through}$ تعریف نمود. با فرض امکان اختلال گروهی به‌صورت همدوس^۷ توسط m ریز پرنده حامل جمر، برای نسبت JSR داریم

$$J/S = \frac{\sum_{i=1}^m J_i}{S} \quad (15)$$

در رابطه (۱۵) برای توان سیگنال می‌توان نوشت

$$S = \frac{k_s \sigma(\theta_{el}, \theta_{az})}{R_T^4} \quad (16)$$

متوسط پارامتر تخمین‌گر عبارت است از یک بردار و واریانس آن یک ماتریس است. در موارد مواجهه با یک ماتریس واریانس، مسئله بیشینه‌سازی واریانس کاری پیچیده است.

یک رویکرد برای مواجهه با پیچیدگی مذکور عبارت است از استفاده از معیارهای بهینگی که مبتنی بر فشرده‌سازی ماتریس اطلاعات هستند. این معیارهای بهینگی که تابعی از مقادیر ویژه ماتریس اطلاعات FIM (که ماتریس معکوس ماتریس واریانس است) می‌باشند، عبارتند از: A-بهینگی، C-بهینگی، D-بهینگی، E-بهینگی و T-بهینگی [۱۴]. در ادامه اشاره‌ای به معیارهای بهینگی A شده است (مطالب این قسمت از مرجع [۱۵] استخراج شده است).

معیار بهینگی A

$$\arg \max_{X_1, \dots, X_N} \text{Trace}(FIM^{-1}) = \arg \max_{X_1, \dots, X_N} \frac{\text{Trace}(FIM)}{|FIM|} \quad (13)$$

معیار بهینگی A، در اصل به کمینه ساختن متوسط واریانس تخمین‌ها منجر می‌شود؛ ولی چون در اینجا هدف ایجاد اختلال است، در رابطه (۱۳) از مفهوم معکوس یعنی بیشینه‌سازی استفاده شده است.

اما رویکرد دیگر در مواجهه با پیچیدگی بیشینه‌سازی ماتریس واریانس، استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری^۱ نظیر الگوریتم ژنتیکی، بهینه‌سازی کولونی^۲ و سایر روش‌های مشابه^۳ است. به عنوان مثال در مرجع [۷] که هدف آن کاهش دقت تخمین رادار MIMO توزیع شده با بیشینه‌سازی CRB تخمین است، توان ارسالی جمر به سمت اولین تا N امین گیرنده رادار MIMO توزیع شده به عنوان پارامترهای بهینه سازی ($X_1, \dots, X_N$) در نظر گرفته شده و از الگوریتم PSO^۴ برای حل مسئله استفاده شده است.

۲-۴ برد سوختن ($R_{Burn-Through}$) [۱۶]

یکی دیگر از شاخص‌های ارزیابی میزان اثربخشی اختلال راداری، $R_{Burn-Through}$ می‌باشد. همانگونه که می‌دانیم $R_{Burn-Through}$ بردی را مشخص می‌نماید که در آن توان سیگنال بازگشتی از هدف مساوی یا بیشتر از توان سیگنال اختلال است. فاکتورهای همچون افزایش توان جمر، افزایش بهره آنتن جمر، کاهش فاصله جمر تا رادار و افزایش تعداد جمر سبب کاهش بیشتر $R_{Burn-Through}$ می‌گردند. در شکل (۴) نمایی از مفهوم $R_{Burn-Through}$ ملاحظه می‌گردد.

¹ heuristic algorithm

² colony optimization

³ simulated annealing, tabu search

⁴ Particle Swarm Optimization

⁵ Signal to Jammer Ratio

⁶ Burn Through

⁷ Coherent

و برای توان هر گره جمری خواهیم داشت

$$J_i = \frac{k_{J_i} G_{RJ_i}}{R_{J_i}^2} \quad (۱۷)$$

که در رابطه (۱۶)، k_s ضریبی در برگرنده توان ارسالی، طول موج و بهره آنتن رادار است. در رابطه (۱۷) نیز k_{J_i} حاوی پارامترهای جمر همچون توان ارسالی و طول موج است.

با فرض اینکه فاصله هر ریز پرنده جمری تا رادار تقریباً یکسان و هدف رادار، یکی از ریز پرنده ها در نظر گرفته شود ($R \approx R_T \approx R_{J_1} \approx \dots \approx R_{J_m}$) می توان نوشت

$$(J/S)_{\text{Burn-Through}} \leq J/S = \frac{\sum_{i=1}^m K_{J_i} G_{RJ_i} R^2}{K_S \sigma(\theta_{el}, \theta_{az})} \quad (۱۸)$$

که با یک جابه جایی خواهیم داشت

$$\sigma(\theta_{el}, \theta_{az}) \leq \sigma_{\text{Burn-Through}}(R) = \frac{\sum_{i=1}^m K_{J_i} G_{RJ_i} R^2 (S/J)_{\text{Burn-Through}}}{K_S} \quad (۱۹)$$

تعبیر معادله (۱۹) آنست که مرز اثر بخشی اخلاص از دیدگاه سطح مقطع راداری تا حدیست که σ لحظه ای هدف (با توجه به زوایای سمت^۱ و ارتفاع^۲) از $\sigma_{\text{Burn-Through}}(R)$ بیشتر نشود. به محض تجاوز سطح مقطع لحظه ای هدف از حد تعیین شده، دیگر سیگنال هدف حتی در حضور نویز عامدانه، توسط رادار آشکار خواهد شد.

۲-۶- نسبت انرژی اخلاص خروجی به ورودی^۳ [۱۸]

شاخص دیگر جهت ارزیابی اثر اخلاص می تواند به صورت نسبت انرژی اخلاص خروجی به ورودی مطابق با رابطه (۲۰) تعریف گردد.

$$\beta = J_o / J_i \quad (۲۰)$$

فرض کنید مطابق شکل (۵) جمرهای توزیع شده قرار است در برابر یک سیستم راداری مالتی استاتیک بکار روند.



شکل (۵) هندسه سیستم راداری مالتی

استاتیک، هدف و جمر

در این صورت $S_i(t)$ سیگنال اکوی هدف در گیرنده رادار i ام،

$n_i(t)$ نویز، $q_i(t)$ سیگنال اخلاص دریافتی و $x_i(t)$ کل سیگنال دریافتی رادار i ام مطابق با رابطه (۲۱) باشد.

$$x_i(t) = s_i(t) + n_i(t) + q_i(t) \quad (۲۱)$$

در این صورت مطابق رابطه (۲۲)، رادار مذکور برای حذف اثر اخلاص، سیگنال اخلاص تخمین زده شده $\hat{q}_i(t)$ را از سیگنال $x_i(t)$ کم خواهد کرد.

$$x_i(t) - \hat{q}_i(t) = s_i(t) + n_i(t) + q_i(t) - \hat{q}_i(t) \quad (۲۲)$$

با این توضیح J_o عبارت است از

$$J_o = E \left[|q_i(t) - \hat{q}_i(t)|^2 \right] \quad (۲۳)$$

و J_i به صورت رابطه (۲۴) می باشد.

$$J_i = E \left[|q_i(t) q_i^*(t)| \right] \quad (۲۴)$$

در واقع J_o انرژی باقیمانده سیگنال اخلاص در گیرنده رادار و J_i انرژی سیگنال اخلاص ارسالی توسط جمر است. در یک اخلاص مؤثر انتظار می رود که نسبت J_o / J_i بیشینه مقدار ممکن باشد.

۲-۷- درصد کاهش برد آشکارسازی رادار

چنانچه R_j برد آشکارسازی رادار j ام در شرایط عادی و R'_j برد آشکارسازی همان رادار تحت شرایط اخلاص باشد، می توان نوشت

$$\alpha_{ij} = \frac{R'_j}{R_j} \quad (۲۵)$$

که بین دو برد آشکارسازی فوق، رابطه (۲۶) برقرار است.

$$R'_j = \left(\frac{1}{L_{ij}} \right)^{\frac{1}{4}} R_j \quad (۲۶)$$

و برای L_{ij} داریم

$$L_{ij} = 1 + \frac{J_{ij}}{N_j} \quad (۲۷)$$

که در رابطه (۲۷)، N_j نویز حرارتی گیرنده رادار j ام (مطابق با رابطه (۲۸)) و J_{ij} توان جمر i ام در لوب اصلی رادار j ام (مطابق با رابطه (۲۹)) می باشد.

$$N_j = KTF_j B_j \quad (۲۸)$$

$$J_{ij} = \frac{P_i G_i G_j \lambda^2}{(4\pi R_i)^2 L_j} \left(\frac{B_j}{B_i} \right) K_{ij} \quad (۲۹)$$

که در رابطه (۲۹)، K_{ij} بهره شکل موج جمر i ام در پردازشگر رادار j ام است.

درصد کاهش برد آشکارسازی رادار، از رابطه (۳۰) به دست می آید.

$$q_{ij} = 1 - \alpha_{ij} = 1 - \left(\frac{1}{L_{ij}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (۳۰)$$

^۱ azimuth

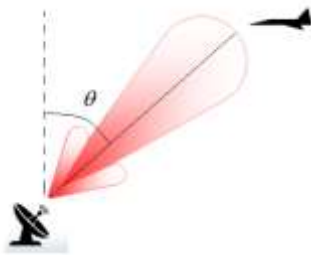
^۲ elevation

^۳ output-to-input jamming energy ratio

$$q_{ij} = 1 - \left(\frac{1}{1 + J_{ij} / N_j} \right)^{1/4} \quad (36)$$

۲-۸ زمان متوسط برای از دست رفتن قفل (حلقه ردیابی) $MTLL^3$ [۱۹]

در شکل (۶) فرض کنید رادار قصد دارد که زاویه θ را به وسیله حلقه کنترل ردیابی نماید. در این صورت به زمان متوسط جهت از دست رفتن قفل حلقه ردیابی θ ، $MTLL$ گفته می-شود. با این تعریف واضح است که دیمانسیون $MTLL$ ثانیه (s) می‌باشد.



شکل (۶) هندسه سناریوی ردیابی

حال از دیدگاه جنگ الکترونیک، هر چه بتوان مقدار $MTLL$ مربوط به یک سیستم ردیابی راداری را بیشتر کاهش داد، اختلال مؤثرتری صورت پذیرفته است. در مرجع [۱۹] اختلال مؤثر، اختلالی در نظر گرفته شده است که سبب شود تا $MTLL$ مربوط به حلقه ردیابی رادار دشمن حدوداً ۱۰ ثانیه شود. در نظر گرفتن عدد مذکور به این دلیل است که سیستم هدایت تسلیحات رادار دشمن در این بازه زمانی اندک قادر نخواهد بود که به شرایط لازم و کافی برای آتش شدن برسد.

J/S_{MTLL} اشاره به نسبت جمر به سیگنال مورد نیاز برای شکستن قفل ردیابی در مدت زمان معین (مثلاً ۱۰ ثانیه) دارد که می‌تواند به عنوان یک شاخص جهت ارزیابی اثر اختلال بر روی رادارهای رهگیر در نظر گرفته شود.

۳-۲. تعیین تابع منفعت^۴

حلقه واصل بین ضرایب تهدید رادارها، ماتریس اثربخشی و ماتریس تخصیص، تابع منفعت است. مقدار این تابع به ازای هر الگوی تخصیص به صورت جداگانه محاسبه و الگویی به عنوان الگوی زیر بهینه انتخاب می‌گردد که تابع منفعت آن بیشینه گردد. یک نمونه از توابع منفعت در رابطه (۳۷) قابل ملاحظه است [۲۰].

$$F = \sum_{j=1}^N \varpi_j \left(1 - \prod_{i=1}^M (1 - q_{ij})^{x_{ij}} \right) \quad (37)$$

که در رابطه (۳۷)، N تعداد رادارها، M تعداد جمرها، ω_j

میزان کاهش برد آشکارسازی مذکور در رابطه (۳۰)، بر اساس یک سناریوی اختلال دور ایستا^۱ مطابق توضیحات ذیل به دست آمده است.

همان‌گونه که می‌دانیم در یک سناریوی اختلالی دور ایستا، بسته به جهت آنتن‌های جمر و رادار نسبت به هم دو حالت اختلال یکی از پرتو اصلی و دیگری از پرتو کناری قابل تصور است. چنانچه نسبت به تداخل^۲ در آشکارساز CFAR، نام‌گذاری شود، نسبت مذکور وابسته به پارامترهای رادار و جمر بوده و برای آن می‌توان نوشت:

$$\frac{S}{I} = \frac{S}{J + N} \quad (31)$$

که در رابطه (۳۱)، S توان سیگنال هدف، J توان اختلال و N نویز حرارتی می‌باشد. می‌توان معادله (۳۱) را به صورت معادله (۳۲) نوشت

$$\frac{S}{I} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{J}{S}} + \frac{1}{S}} \quad (32)$$

و بنابراین خواهیم داشت

$$\frac{S}{I} = \frac{\frac{S}{N}}{1 + \frac{J}{N}} \quad (33)$$

که در رابطه (۳۳)، S/N همان SNR معمول در آشکارساز CFAR می‌باشد که این مقدار می‌تواند به وسیله معادله معمول برد رادار به دست آید. با تبدیل رابطه (۳۳) به دی بی (dB)، خواهیم داشت

$$\left(\frac{S}{I} \right)_{dB} = \left(\frac{S}{N} \right)_{dB} - \left(\frac{J}{N} + 1 \right)_{dB} \quad (34)$$

و با یک جابه‌جایی ساده خواهیم داشت

$$\left(\frac{S}{N} \right)_{dB} - \left(\frac{S}{I} \right)_{dB} = \left(\frac{J}{N} + 1 \right)_{dB} \quad (35)$$

می‌توان سمت چپ رابطه (۳۵) را میزان افت نسبت سیگنال به نویز به دلیل حضور اختلال (بر حسب dB) در نظر گرفت که این میزان افت، همانگونه که در رابطه مذکور مشخص است، می‌تواند با محاسبه $(1 + J/N)_{dB}$ به دست آید. افت $(1 + J/N)_{dB}$ در SNR به دلیل حضور اختلال متناسب با کاهش در برد آشکارسازی رادار قربانی می‌باشد. بنابراین با نامگذاری میزان افت مذکور با نماد L رابطه (۲۷) حاصل خواهد شد.

بنابر توضیحات فوق، با جایگذاری L_{ij} با میزان $(1 + J_{ij} / N_j)$ رابطه (۳۰) به صورت رابطه (۳۶) درخواهد آمد.

³ Mean Time to Loss Lock

⁴ benefit function

¹ Stand off

² Signal to Interference

نمود و برای مدل و حل کردن مسئله از مبانی نظریه بازی ها نیز کمک گرفت [۲۰، ۲۲]. برخی دیگر از ابزارهایی که می توان برای حل مسئله از آن ها کمک گرفت عبارتند از: الگوریتم بهینه سازی ترکیبی [۲۱]، الگوریتم حریصانه^۲ [۹] و الگوریتم ژنتیکی [۵].

۲-۶. تشکیل ماتریس تخصیص

ماتریس تخصیص یک ماتریس $M \times N$ (M تعداد جمرها و N تعداد رادارها) است که هر یک از درایه های آن صرفاً یکی از دو مقدار 0 یا 1 را می پذیرد. در این ماتریس $x_{ij} = 1$ به معنای تخصیص جمر i ام به رادار j ام و $x_{ij} = 0$ نشان از عدم تخصیص است.

۲-۷. تعیین فرضیات مسئله

موضوع دیگر تعیین فرضیات مسئله است. چارچوب برخی فرضیات ممکن در **Error! Reference source not found.** قابل ملاحظه است.

به جز موارد اشاره شده در جدول مذکور، فرضیات جزئی تری نیز ممکن است وجود داشته باشد، اما نکته مهم آن است که در هر صورت، حل مسئله باید از یک نقطه ساده و سراسر شروع شود و به سمت حالات پیچیده تر حرکت نماید.

۲-۳. الگوریتم اخلاص گروهی هدفمند مبتنی بر

مزایده به همراه سناریوهای پیشنهادی

الگوریتم مزایده ای مذکور در [۹] به این معناست که هر جمر با توجه به ظرفیت خود در ایجاد اخلاص در رادارهای هدف، بهترین طرح خود را از منظر افزایش اخلاص انتخاب می کند. سپس نوبت به جمر بعدی می رسد و همین روند تا پایان انتخاب کل جمرها ادامه می یابد. سؤالی که اینجا مطرح می شود این است که کار از کدام جمر شروع شود. پاسخ این است که قبل از شروع فرآیند، یک جایگشت تصادفی بین جمرها ایجاد می شود. این فرآیند می تواند به تعداد حالات ممکن ترتیب شروع جمرها تکرار شود و در نهایت تخصیصی به عنوان خروجی در نظر گرفته شود که متناسب با بیشترین تابع مزیت کل باشد. سؤال دیگر اینکه شاخص ارزیابی اثر اخلاص در شبیه سازی حاضر چیست؟ پاسخ این است که اثر اخلاص با شاخص کاهش برد آشکارسازی رادار سنجیده می شود [۱۶].

۲-۱. تشریح الگوریتم

همان گونه که در بخش ۲- اشاره گردید، اجزای کلی الگوریتم اخلاص گروهی را می توان در هفت بخش ذیل ارائه نمود:

اول: تعیین ضرایب تهدید رادارها

ضرایب تهدید رادارها عددی بین ۰ تا ۱۰۰٪ فرض می شود.

دوم: تشکیل ماتریس اثربخشی

ضرایب تهدید رادار j ام، q_{ij} درایه ij ام ماتریس اثربخشی و x_{ij} درایه ij ام ماتریس تخصیص با مقدار 1 یا 0 بیانگر متغیر تخصیص یا عدم تخصیص جمر i ام به رادار j ام می باشد.

۲-۴. تعیین قیود مسئله

قیود مسئله می تواند شامل مواردی همچون بندهای زیر باشد:

الف- جمرها باید ابتدا رادار دارای بیشترین ضریب تهدید را مختل نمایند.

ب- یک جمر می تواند چندین رادار دارای بازه فرکانسی مشابه را مختل نماید.

ج- چند جمر می توانند به طور هم زمان یک رادار را مختل نمایند.

د- هر جمر دارای چندین الگوی کاری متفاوت است، اما در یک دوره زمانی مشخص تنها یکی از آن الگوها مورد استفاده قرار می گیرد.

قیود چهارگانه فوق که از مرجع [۶] استخراج شده است، تنها یک نمونه از تعریف قیود را بیان می کند؛ بنابراین با توجه به سناریوی اخلاص گروهی مورد نظر و با در نظر گرفتن درجه آزادی مسئله، لازم است قیود مورد نظر به درستی تعریف گردد.

همان گونه که از قیود چهارگانه فوق قابل ملاحظه است، یکی از موارد مهم در تعریف قیود مسئله وضعیت تعداد جمرها و رادارهاست. در این راستا لازم به ذکر است که هر مسئله تخصیص منابع اخلاص گروهی از سه حالت زیر خارج نیست [۲۱]: حالت اول) $M = N$ (برابر بودن تعداد جمرها با رادارها) در یک استراتژی دلخواه می توان تخصیص یک به یکی بین جمرها و رادارها برقرار نمود.

حالت دوم) $M > N$ (بیشتر بودن تعداد جمرها از رادارها) می توان به یک رادار واحد، چند جمر تخصیص داد که در این صورت برای تضمین حداکثر راندمان اخلاص، مسئله همدوسی^۱ جمرها و ترکیب فضایی توان اهمیت می یابد.

حالت سوم) $M < N$ (کمتر بودن تعداد جمرها از رادارها) می توان رادارهای دارای مشخصات مشابه را دسته بندی نموده و از یک جمر برای ایجاد اخلاص در چند رادار هم کلاس استفاده نمود.

۲-۵. انتخاب استراتژی حل مسئله

با توجه به اینکه رادار هدف ممکن است دارای قابلیت های مقابله با اخلاص (ECCM^۲) باشد، از این رو این احتمال وجود دارد که رادار برای مقابله با اخلاص، مشخصات کاری خود را تغییر دهد. بنابراین می توان به مسئله به صورت یک فرآیند کنش-واکنشی نگاه نمود. در کل می توان جمر و رادار را دو بازیگر فرض

¹ Coherency

² Electronic Counter-CounterMeasure

³ Greedy

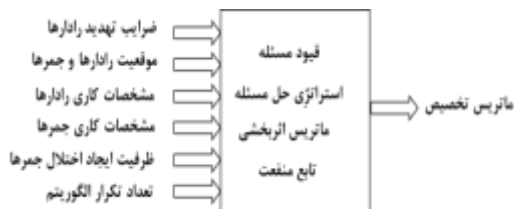
ورودی‌های الگوریتم عبارت‌اند از:

- الف- ضرایب تهدید رادارها
- ب- موقعیت رادارها و جمرها
- ج- مشخصات فرکانسی، توانی، بهره آنتن، عدد نویز، پهنای باند رادارها
- د- مشخصات توانی، بهره آنتن، پهنای باند، افت، بهره شکل موج جمرها
- و- ظرفیت ایجاد اختلال جمرها
- ز- تعداد تکرار الگوریتم (فرصت بررسی)

خروجی الگوریتم عبارت است از:

خروجی الگوریتم ماتریس تخصیص است؛ یعنی ماتریسی که تعداد سطرهای آن متناظر با تعداد جمرها و تعداد ستون‌های آن متناظر با تعداد رادارها است. درایه‌های این ماتریس تنها دو مقدار ۰ و ۱ را می‌پذیرد. درج عدد ۰ در یک درایه به معنای عدم تخصیص جمر به رادار و درج عدد ۱ به معنای تخصیص جمر به رادار می‌باشد. به عنوان مثال $x_{34} = 1$ به این معناست که جمر شماره ۳ باید به اختلال رادار ۴ بپردازد. یا به عنوان مثالی دیگر $x_{46} = 0$ به این معنای این است که لازم نیست آنتن جمر شماره ۴ به سمت رادار شماره ۶ تنظیم شود.

در یک نگاه ورودی - خروجی الگوریتم به صورت شکل (۷) است.



شکل (۷) ورودی - خروجی الگوریتم

۲-۳. سناریوی پیشنهادی اول: عدم اطلاع دقیق از

مکان استقرار رادارها

از آنجا که در یک سناریوی واقعی امکان عدم اطلاع دقیق از مکان رادارها وجود دارد، در ادامه فاصله جمر تا رادار به صورت متغیر تصادفی با توزیع گاوسی در نظر گرفته شده است. در اینجا از شاخص کاهش برد آشکارسازی رادار استفاده شده است. میزان کاهش برد آشکارسازی رادار را می‌توان مطابق رابطه (۳۰) محاسبه نمود [۱۶].

و به جای J_{ij} / N_j مطابق با روابط (۲۸) و (۲۹) می‌توان نوشت

$$\frac{J_{ij}}{N_j} = \frac{P_i G_i G_j \lambda^2 \left(\frac{B_i}{B_j}\right) K_{ij}}{(4\pi R_i)^2 L_j KTF_j B_j} \quad (38)$$

همان‌گونه که ذکر شد، جهت ارزیابی راندمان اختلال گروهی لازم است اثر حاصل از تخصیص هر جمر به هر رادار محاسبه شود. سپس با استفاده از مقادیر به دست آمده به عنوان درایه‌های یک ماتریس $M \times N$ (M تعداد جمرها و N تعداد رادارها)، ماتریس اثربخشی تشکیل گردد.

در متن حاضر، ارزیابی راندمان اختلال هر جمر بر روی هر رادار، با شاخص کاهش برد آشکارسازی رادار طبق رابطه (۳۶) سنجیده شده است.

سوم: تعیین تابع منفعت

تابع منفعت مطابق با رابطه (۳۷) در نظر گرفته شده است.

چهارم: تعیین قیود مسئله

سه قید مورد استفاده عبارت‌اند از:

- ۱- جمرها باید ابتدا رادار دارای بیشترین ضریب تهدید را مختل نمایند.
- ۲- یک جمر می‌تواند چندین رادار را مختل نماید.
- ۳- چند جمر می‌توانند به طور همزمان یک رادار را مختل نمایند.

پنجم: انتخاب استراتژی حل مسئله

همان‌گونه که پیش‌ازین نیز ذکر شد، در مقاله حاضر از الگوریتم مزایده‌ای مذکور در مرجع [۹] استفاده شده است. به این معنا که ابتدا یک جمر شروع به انتخاب بهترین طرح تخصیصی خود می‌نماید (ترتیب جمرها با یک جایگشت تصادفی تعیین می‌گردد). سپس ضرایب تهدید مربوط به رادارهای انتخاب شده توسط این جمر، به روزرسانی می‌شود. سپس نوبت به جمر بعدی می‌رسد و این روند تا انتخاب طرح تخصیصی جمر آخر ادامه می‌یابد. در نهایت یک ماتریس تخصیص به دست می‌آید. اگر همچنان فرصت بررسی باشد (فرصت بررسی می‌تواند به عنوان یک ورودی به الگوریتم داده شود)، همین فرآیند یک دور دیگر با ترتیب دیگری از جمرها ادامه می‌یابد. در پایان ماتریس تخصیصی به عنوان خروجی گزارش می‌شود که متناظر با بیشترین منفعت باشد.

ششم: تشکیل ماتریس تخصیص

همان‌گونه که در بخش ۲-۶ بیان گردید، ماتریس تخصیص یک ماتریس $M \times N$ (M تعداد جمرها و N تعداد رادارها) است که هر یک از درایه‌های آن صرفاً یکی از دو مقدار ۰ یا ۱ را می‌پذیرد. در شبیه‌سازی‌های این مقاله تعداد جمرها ۳ و تعداد رادارها بین ۶ و ۷ عدد متغیر است.

هفتم: تعیین فرضیات مسئله

فرضیات اصلی مسئله در زیربخش‌های ۲-۳ (عدم اطلاع دقیق از مکان استقرار رادارها) و ۳-۳ (عدم اطلاع دقیق از مکان و فرکانس کاری رادارها) تشریح گردیده است.

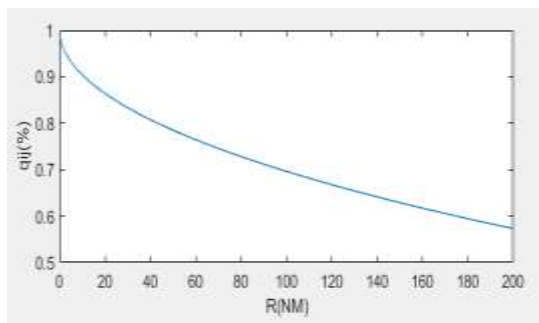
ورودی - خروجی‌های الگوریتم به شرح ذیل هستند.

با در نظر گرفتن تغییرات R از $0/1 \text{ NM}$ تا 200 NM و با فرضیات زیر، تابع چگالی احتمال $f_{Q_{ij}}(q_{ij})$ (pdf) در شکل (۹) قابل ملاحظه است. همانگونه که در شکل (۹) ملاحظه می گردد، تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی q_{ij} نیز گاوسی شکل می باشد. همچنین لازم به ذکر است که تغییرات متغیر تصادفی q_{ij} بر حسب متغیر تصادفی R در شکل (۸) قابل ملاحظه است.

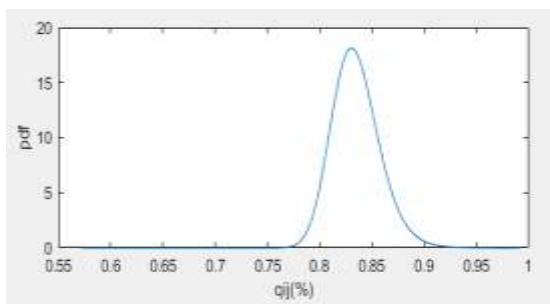
جدول (۱) مقادیر استفاده شده در شبیه سازی شکل (۸) و شکل (۹)

واحد	مقدار	پارامتر
dB	10	توان جمر
dB	10	بهره آنتن جمر
MHz	300	پهنای باند جمر
dB	1	افت جمر
dB	5	گین پردازش جمر
dB	33/5	بهره آنتن رادار
MHz	100	پهنای باند رادار
GHz	2/9	فرکانس رادار
dB	5	F
m/s	3×10^8	C
J/K	$1/38 \times 10^{-23}$	K
K	290	T

تغییرات q_{ij} بر حسب R در شکل (۸) قابل ملاحظه است.



شکل (۸) تغییرات متغیر تصادفی q_{ij} بر حسب متغیر تصادفی R



شکل (۹) تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی q_{ij}

۳-۳. سناریوی پیشنهادی دوم: عدم اطلاع دقیق از

مکان و فرکانس کاری رادارها

با فرض عدم اطلاع دقیق از مکان و همچنین فرکانس کاری

با توجه به اینکه در رابطه (۳۸) تنها متغیر تصادفی R_i بوده و بقیه متغیرها یقینی می باشند، به جای رابطه مذکور می توان نوشت

$$\frac{J_{ij}}{N_j} = \frac{C_{ij}}{R_i^2} \quad (۳۹)$$

که در آن C_{ij} برابر است با

$$C_{ij} = \frac{P_i G_i G_j \lambda^2 K_{ij}}{(4\pi)^2 L_j K T F_j B_i} \quad (۴۰)$$

بنابراین با جایگذاری رابطه (۳۹) در رابطه (۳۶) خواهیم داشت

$$q_{ij} = 1 - \left(\frac{1}{1 + C_{ij} / R_i^2} \right)^{1/4} \quad (۴۱)$$

با فرض گاوسی بودن توزیع متغیر تصادفی R_i ، تابع چگالی احتمال آن عبارت است از

$$f_{R_i}(r_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-(r_i - \mu_i)^2 / 2\sigma_i^2} \quad (۴۲)$$

حال باتوجه به قضیه زیر، می توان تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی q_{ij} را به دست آورد.

قضیه ۱ [۲۳]:

اگر X یک متغیر تصادفی پیوسته با تابع چگالی احتمال $f_X(x)$ باشد، برای به دست آوردن تابع چگالی احتمال $Y = g(X)$ با استفاده از روش تبدیل، چنانچه $g(x)$ تابعی مشتق پذیر و اکیدا یکنوا باشد، خواهیم داشت

$$f_Y(y) = \sum_{i=1}^n \frac{f_X(x_i)}{|g'(x_i)|} \quad (۴۳)$$

که در رابطه (۴۳)، $x_1, x_2, \dots, x_n$ ریشه های معادله $g(x) = y$ می باشند.

در اینجا ریشه ها عبارت اند از (ریشه های رابطه (۴۱))

$$R_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{C_{ij}(1 - q_{ij})^4}{1 - (1 - q_{ij})^4}} \quad (۴۴)$$

مشتق موجود در رابطه (۴۳) نیز عبارت است از

$$q_{ij} = \frac{-C_{ij}}{2R_1^3} \left(1 + \frac{C_{ij}}{R_1^2} \right)^{-5/4} \quad (۴۵)$$

بنابراین، متناظر با رابطه (۴۳) و با در نظر گرفتن توزیع

نرمال برای متغیر تصادفی R ، عبارت خواهد بود از

$$f_{Q_{ij}}(q_{ij}) = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{\frac{-(R_1 - \mu)^2}{2\sigma^2}}}{\left| \frac{-C_{ij}}{2R_1^3} \left(1 + \frac{C_{ij}}{R_1^2} \right)^{-5/4} \right|} + \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{\frac{-(R_2 - \mu)^2}{2\sigma^2}}}{\left| \frac{-C_{ij}}{2R_2^3} \left(1 + \frac{C_{ij}}{R_2^2} \right)^{-5/4} \right|} \quad (۴۶)$$

و می توان تعریف کرد

$$W = X \quad (54)$$

پس رابطه (۵۱) به صورت رابطه (۵۵) بازنویسی می گردد.

$$f_{Q_{ij}W}(q_{ij}, w) = f_{R_i F_i}(h_1(q_{ij}, w), h_2(q_{ij}, w)) |J| \quad (55)$$

می توان نوشت

$$\begin{cases} r_i = w_i \\ f_i = \frac{1}{w_i} \sqrt{\frac{c_{ij}'(1-q_{ij})^4}{1-(1-q_{ij})^4}} \end{cases} \quad (56)$$

و نیز داریم

$$J = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ \frac{-2c_{ij}'^{1/2}(1-q_{ij})}{w_i(1-(1-q_{ij})^4)^{3/2}} & NI \end{vmatrix} \quad (57)$$

که منظور از NI در رابطه (۵۷)، "بدون اهمیت" می باشد،

چرا که برای محاسبه دترمینان J، این درایه در صفر ضرب می شود و اهمیتی ندارد.

پس داریم

$$|J| = \frac{2c_{ij}'^{1/2}(1-q_{ij})}{w_i(1-(1-q_{ij})^4)^{3/2}} \quad (58)$$

و با توجه به استقلال متغیرهای تصادفی R_i و F_i برای

$$f_{R_i F_i}(r_i, f_i)$$

$$f_{R_i F_i}(r_i, f_i) = f_{R_i}(r_i) \times f_{F_i}(f_i) \quad (59)$$

همان گونه که پیش از این بیان شد، فرکانس کاری و همچنین فاصله رادارها با توزیع یکنواخت فرض می شود؛ بنابراین برای رابطه (۵۹) خواهیم داشت

$$f_{R_i F_i}(r_i, f_i) = \frac{1}{(R_{\max_i} - R_{\min_i})} \frac{1}{(F_{\max_i} - F_{\min_i})} \quad (60)$$

که $(R_{\min_i} \leq r_i \leq R_{\max_i})$ $f_{R_i}(r_i) = \frac{1}{(R_{\max_i} - R_{\min_i})}$ و

$$(F_{\min_i} \leq f_i \leq F_{\max_i}) \quad f_{F_i}(f_i) = \frac{1}{(F_{\max_i} - F_{\min_i})}$$

با فرض $1 \leq r_i \leq 20$ مایل دریایی و $2 \leq f_i \leq 4$ گیگاهرتز، محدوده پوشش فاصله و فرکانس رادار i ام به صورت شکل (۱۰) خواهد بود.

رادارهای هدف، فضای مسئله احتمالاتی تر خواهد شد. در این مکان رادارها تصادفی با توزیع یکنواخت و فرکانس کاری رادارها نیز با توزیع یکنواخت در نظر گرفته می شود. با در نظر گرفتن دو متغیر تصادفی، رابطه (۴۱) به صورت رابطه (۴۷) در خواهد آمد.

$$q_{ij} = 1 - \left(\frac{1}{1 + \frac{c_{ij}'}{(R_j f_j)^2}} \right)^{1/4} \quad (47)$$

که در رابطه (۴۷)، c_{ij}' عبارت است از

$$c_{ij}' = \frac{P_i G_i G_j c^2 K_{ij}}{(4\pi)^2 L_j K T F_j B_i} \quad (48)$$

اکنون باید به دنبال تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی q_{ij}

بود.

قضیه ۲ [۲۴]:

فرض کنید X و Y دو متغیر تصادفی تواما پیوسته باشند و داشته باشیم

$$(Z, W) = g(X, Y) = (g_1(X, Y), g_2(X, Y)) \quad (49)$$

که $g: \mathbb{R}^2 \mapsto \mathbb{R}^2$ یک تابع یک به یک (معکوس پذیر) پیوسته با مشتقات جزئی پیوسته باشد. با در نظر گرفتن $h = g^{-1}$

$$(X, Y) = h(Z, W) = (h_1(Z, W), h_2(Z, W)) \quad (50)$$

در این صورت Z و W تواما پیوسته با pdf توام $f_{ZW}(z, w)$ برای $(z, w) \in R_{ZW}$ به صورت رابطه (۵۱) به دست خواهد آمد.

$$f_{ZW}(z, w) = f_{XY}(h_1(z, w), h_2(z, w)) |J| \quad (51)$$

که J ژاکوبین h به صورت رابطه (۵۲) تعریف شده است.

$$J = \det \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial z} & \frac{\partial h_1}{\partial w} \\ \frac{\partial h_2}{\partial z} & \frac{\partial h_2}{\partial w} \end{bmatrix} = \frac{\partial h_1}{\partial z} \cdot \frac{\partial h_2}{\partial w} - \frac{\partial h_2}{\partial z} \cdot \frac{\partial h_1}{\partial w} \quad (52)$$

همانگونه که ملاحظه می گردد، برای محاسبه رابطه (۵۱)، $f_{XY}(x, y)$ لازم است که در صورت استقلال متغیرهای تصادفی X و Y ، تابع چگالی احتمال توام آن ها به صورت رابطه (۵۳) به دست می آید.

$$f_{XY}(x, y) = f_X(x) \times f_Y(y) \quad (53)$$

بنابراین طبق قضیه ۲، تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی q_{ij} (رابطه (۴۷)) مطابق با مراحل زیر به دست می آید.

برای استفاده از قضیه ۲، نیاز به دو متغیر تصادفی Z و W وجود دارد. با تطبیق پارامترهای مسئله با قضیه ۲ خواهیم داشت $Z = Q_{ij}$

$$X = R_i$$

$$Y = F_i$$

¹ Not Important

که با جایگذاری رابطه (۶۱) در رابطه (۶۲) داریم

$$f_{Q_{ij}}(q_{ij}) = \frac{2\lambda c_{ij}^{1/2}(1-q_{ij})}{(R_{\max_i} - R_{\min_i})(F_{\max_i} - F_{\min_i})(1-(1-q_{ij})^4)^{3/2}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dw_i}{w_i} \quad (63)$$

با توجه به اینکه $\int \frac{dw_i}{w_i} = \ln(|w_i|) + c$ ، رابطه (۶۳) به صورت رابطه (۶۴) در خواهد آمد.

$$f_{Q_{ij}}(q_{ij}) = \frac{2\lambda c_{ij}^{1/2}(1-q_{ij})}{(R_{\max_i} - R_{\min_i})(F_{\max_i} - F_{\min_i})(1-(1-q_{ij})^4)^{3/2}} \ln(|w_i|) \Big|_{-\infty}^{\infty} \quad (64)$$

با نامگذاری طبق رابطه (۶۵)، رابطه (۶۴) به صورت رابطه (۶۶) در خواهد آمد.

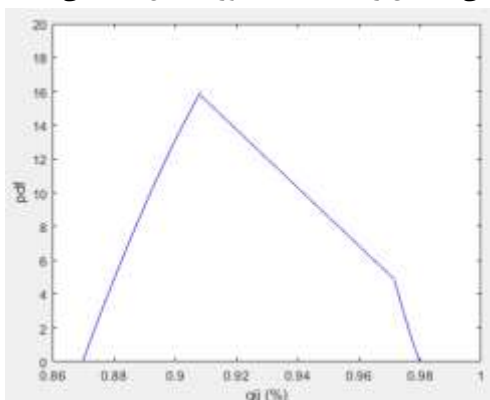
$$k_{ij} = \frac{2\lambda c_{ij}^{1/2}(1-q_{ij})}{(R_{\max_i} - R_{\min_i})(F_{\max_i} - F_{\min_i})(1-(1-q_{ij})^4)^{3/2}} \quad (65)$$

$$f_{Q_{ij}}(q_{ij}) = k_{ij} \ln(|w_i|) \Big|_{-\infty}^{\infty} \quad (66)$$

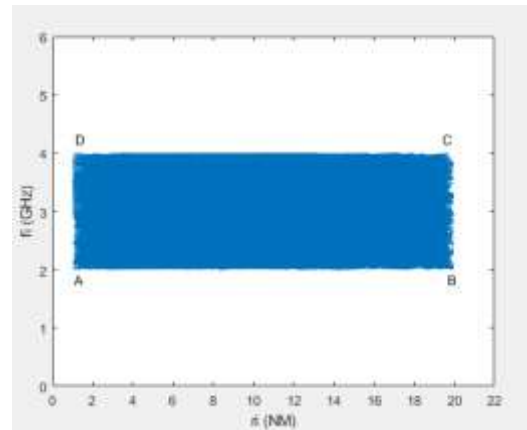
بنابراین با توجه به سه محدوده Z_1, Z_2, Z_3 و شکل (۱۱) و رابطه (۶۶) خواهیم داشت

$$f_{Q_{ij}}(q_{ij}) = \begin{cases} k_{ij} \ln |w_i| \frac{R_{\max_i} c_{ij}^{1/2}}{F_{\max_i} \left[\frac{1}{(1-q_{ij})^4} - 1 \right]^{1/2}} & z_1 \leq q_{ij} < z_2 \\ k_{ij} \ln |w_i| \frac{R_{\min_i} c_{ij}^{1/2}}{F_{\min_i} \left[\frac{1}{(1-q_{ij})^4} - 1 \right]^{1/2}} & z_2 \leq q_{ij} < z_3 \\ k_{ij} \ln |w_i| \frac{R_{\min_i} c_{ij}^{1/2}}{F_{\min_i} \left[\frac{1}{(1-q_{ij})^4} - 1 \right]^{1/2}} & z_3 \leq q_{ij} \leq z_4 \end{cases}$$

که تابع چگالی احتمال رابطه (۶۷) به صورت شکل (۱۲) می باشد.

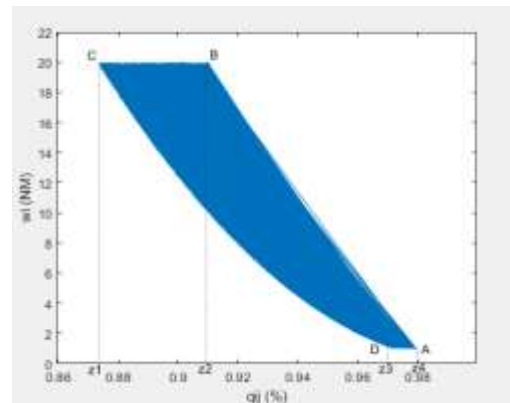


شکل (۱۲) تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی q_{ij}



شکل (۱۰) محدوده پوشش متغیرهای تصادفی فاصله و فرکانس رادار i ام

همانگونه که در شکل (۱۰) ملاحظه می گردد، محور افقی محدوده تغییرات فاصله جمر تا رادار (r_i) و محور عمودی محدوده تغییرات فرکانس کاری رادار (f_i) را نشان می دهد. نتیجه تغییر متغیرهای r_i و f_i مطابق رابطه (۵۶) به صورت شکل (۱۱) خواهد بود.



شکل (۱۱) محدوده پوشش متغیرهای تصادفی w_i و q_{ij} رادار i ام

در شکل (۱۱) نتیجه نگاشت چهار رأس مستطیل نشان داده شده در شکل (۱۰) با اسامی A, B, C و D قابل ملاحظه است. نقاط دیگر شکل (۱۰) نیز هر یک در محل متناظر خود در شکل (۱۱) نگاشت یافته اند.

با جایگذاری رابطه (۵۸) و (۶۰) در رابطه (۵۵) می توان نوشت

$$f_{Q_{ij}W_i}(q_{ij}, w_i) = \frac{1}{(R_{\max_i} - R_{\min_i})} \frac{1}{(F_{\max_i} - F_{\min_i})} \frac{2c_{ij}^{1/2}(1-q_{ij})}{w_i(1-(1-q_{ij})^4)^{3/2}} \quad (61)$$

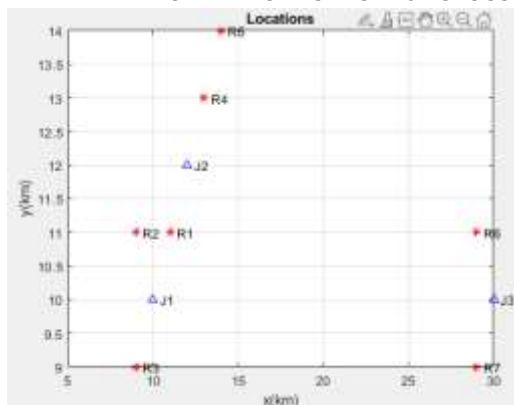
حال برای به دست آوردن تابع چگالی احتمال حاشیه ای داریم $f_{Q_{ij}}(q_{ij})$

$$f_{Q_{ij}}(q_{ij}) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{Q_{ij}W_i}(q_{ij}, w_i) dw_i \quad (62)$$

رادارهای ۶ و ۷ اختصاص می‌یابد. باتوجه به موقعیت‌های نشان‌داده‌شده در شکل (۱۳) طبق انتظار هر جمر مطابق با ظرفیت اخلاقی خود، نزدیک‌ترین رادارها را برگزیده است.

نمونه دوم

مشخصات رادارها و جمرها در این شبیه‌سازی در دو مورد با شبیه‌سازی اول متفاوت است. یکی مکان استقرار جمر شماره دو و همچنین رادار شماره چهار و پنج و دیگری ظرفیت ایجاد اخلاقی جمر دوم که از دو مورد به پنج مورد تغییر یافته است. مکان استقرار رادارها و جمرها در شکل (۱۴) قابل‌ملاحظه است.



شکل (۱۴) موقعیت رادارها و جمرها در شبیه‌سازی دوم

خروجی الگوریتم عبارت است از:

	رادار ۱	رادار ۲	رادار ۳	رادار ۴	رادار ۵	رادار ۶	رادار ۷
جمر ۱							
جمر ۲							
جمر ۳							

باتوجه به جدول فوق، ملاحظه می‌گردد که جمرها از بین رادارها، نزدیک‌ترین‌ها را انتخاب نموده‌اند که کاملاً منطقی است.

نمونه سوم

این شبیه‌سازی نیز به جز در دو مورد مشابه شبیه‌سازی اول است که عبارت‌اند از یکی ۱۰۰٪ فرض کردن ضریب تهدید رادارهای ۴ و ۵ و ۰٪ فرض کردن ضریب تهدید سایر رادارها و دیگری در نظر گرفتن ظرفیت ایجاد اخلاقی هر جمر به تعداد دو. مکان استقرار رادارها و جمرها در شبیه‌سازی حاضر مشابه شبیه‌سازی اول (شکل (۱۳) است.

خروجی الگوریتم عبارت است از:

	رادار ۱	رادار ۲	رادار ۳	رادار ۴	رادار ۵	رادار ۶	رادار ۷
جمر ۱							
جمر ۲							
جمر ۳							

نتیجه حاصله حاکی از این است که هر سه جمر، رادارهای ۴ و ۵ را برگزیده‌اند. با مراجعه به شکل (۱۳) مشخص می‌گردد که این انتخاب صحیح است؛ چرا که ضرایب تهدید رادارهای ۴ و ۵ به میزان ۱۰۰٪ و ضرایب تهدید سایر رادارها ۰٪ است.

که با انتگرال‌گیری از سطح زیر شکل (۱۲) مقدار یک حاصل می‌شود. بنابراین تضمین می‌شود که معادله چند جمله‌ای به دست آمده برای تابع چگالی احتمال مطابق رابطه (۶۷) صحیح می‌باشد.

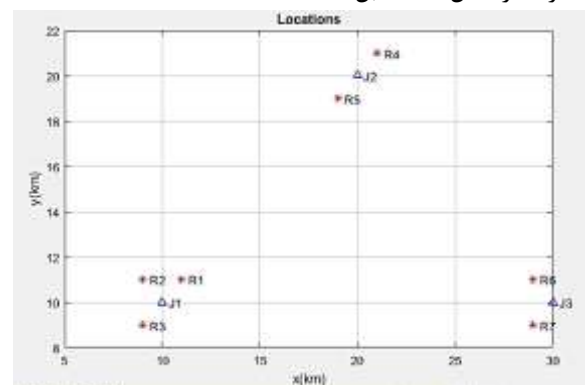
۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش به تبیین چهار نمونه شبیه‌سازی شده، می‌پردازیم. سه نمونه نخست با فرض اطلاع دقیق از مکان و فرکانس کاری رادارهای قربانی و نمونه چهارم با فرض عدم این اطلاع فرض شده است.

نمونه اول

با فرض حضور سه جمر و هفت رادار در صحنه نبرد و با تنظیم پارامترهای زیر، نمونه نخست مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است. مشخصات جمرها عبارت است از توان ۱۰ dB، بهره آنتن ۸ dBi، پهنای باند ۵۰ MHz، افت ۱ dB، بهره شکل موج ۱ dB. مشخصات رادارها نیز عبارت است از بهره ۳۳ dB، پهنای باند ۱ MHz، فرکانس کاری رادار ۲/۹ GHz، عدد نویز ۵ dB، ضریب تهدید ۵۰٪.

لازم به ذکر است که در شبیه‌سازی حاضر تنها تفاوت در مشخصات جمرها مربوط به ظرفیت ایجاد اخلاقی آن‌ها در نظر گرفته شده است. به این ترتیب که جمر شماره یک ظرفیت ایجاد اخلاقی در سه رادار، ولی جمرهای شماره دو و سه هر یک ظرفیت ایجاد اخلاقی در دو رادار را دارند. مکان استقرار رادارها و جمرها در شکل (۱۳) قابل‌ملاحظه است.



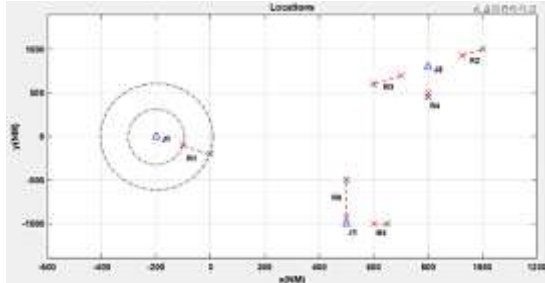
شکل (۱۳) موقعیت رادارها و جمرها در شبیه‌سازی اول و سوم

خروجی الگوریتم عبارت است از:

	رادار ۱	رادار ۲	رادار ۳	رادار ۴	رادار ۵	رادار ۶	رادار ۷
جمر ۱							
جمر ۲							
جمر ۳							

جدول فوق شامل سه سطر (سه جمر) و هفت ستون (هفت رادار) است؛ بنابراین طبق نتایج مذکور، چه رادارهای شماره ۱، ۲ و ۳، جمر شماره ۲ به رادارهای ۴ و ۵ و جمر شماره ۳ به

ترسیم شده پیرامون جمر ۱ به این معنا هستند که اگر رادار ۱ در راستای هر شعاع دلخواه از این دایره قرار بگیرد، برای جمر ۱ تفاوتی ندارد. جهت جلوگیری از ایجاد ازدحام در شکل، از رسم سایر دوایر خودداری شده است.



شکل (۱۵) مکان رادارها و جمرها در شبیه سازی چهارم خروجی الگوریتم عبارت است از:

	رادار ۱	رادار ۲	رادار ۳	رادار ۴	رادار ۵	رادار ۶
جمر ۱						
جمر ۲						
جمر ۳						

همان گونه که ملاحظه می شود، نتایج طبق انتظار است، چرا که جمر ۱ به رادار ۱، جمر ۲ به رادارهای ۲، ۳ و ۴ و جمر ۳ به رادارهای ۵ و ۶ اختصاص یافته است.

۵- جمع بندی

در این مقاله مطالب مطروحه در ارتباط با اخلاص گروهی به صورت ساخت یافته و دسته بندی شده ارائه گردیده است. به عنوان نمونه معیارهای سنجش میزان اثربخشی اخلاص در هشت دسته تقسیم و تبیین شده اند. در زمینه دسته بندی انواع معیارهای سنجش میزان اثربخشی اخلاص، به طور کلی می توان گفت این معیارها یا مبتنی بر منابعی همچون توان، فرکانس، زمان و الگوی اخلاص شکل می گیرد و یا برای ارزیابی اثر اخلاص، میزان خطای ایجاد شده در مکان هندسی تخمین زده شده توسط سامانه های مکان یاب، منجر به یک مسئله بهینه سازی می شود [۲۵].

علاوه بر مطالب فوق، در مقاله حاضر دو سناریوی پیشنهادی جهت اخلاص گروهی هدفمند ذکر شده است. یک سناریو با فرض عدم اطلاع دقیق از مکان رادارهای قربانی و دیگری با فرض عدم اطلاع دقیق از مکان و فرکانس کاری رادارهای قربانی پیشنهاد شده است که برای حل هر یک از دو مسئله مذکور می توان از الگوریتم مزایده ای استفاده نمود.

در بخش نتایج شبیه سازی، چهار نمونه مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. سه نمونه نخست، با فرض اطلاع از مشخصات رادارهای قربانی شبیه سازی شده که با این فرض، اثربخشی هر طرح اخلاص (q_{ij}) به صورت یقینی در تابع منفعت در نظر گرفته شده است. برخلاف سه نمونه نخست، در نمونه چهارم امید اثر بخشی اخلاص یعنی $E(q_{ij})$ جایگزین q_{ij} شده، چرا که در اینجا عدم اطلاع دقیق از مکان و فرکانس کاری

نمونه چهارم

همانگونه که در زیربخش ۳-۳ ملاحظه گردید، با در نظر گرفتن فاصله و فرکانس رادار به صورت تصادفی، متغیر یقینی q_{ij} به متغیر تصادفی با تابع چگالی احتمال $f_{Q_{ij}}(q_{ij})$ تبدیل خواهد شد.

در این صورت برای q_{ij} مورد نیاز در رابطه (۳۷)، به جای قرار دادن یک مقدار یقینی، امید q_{ij} مطابق رابطه (۶۸) جایگزین خواهد شد.

$$E(q_{ij}) = \int_{-\infty}^{\infty} q_{ij} f_{Q_{ij}}(q_{ij}) dq_{ij} \quad (68)$$

با این حساب رابطه (۳۷) تبدیل به رابطه (۶۹) خواهد شد.

$$F = \sum_{j=1}^N w_j \left(1 - \prod_{i=1}^M (1 - E(q_{ij}))^{x_{ij}} \right) \quad (69)$$

مشخصات در نظر گرفته شده در شبیه سازی حاضر به شرح جدول (۲) و جدول (۳) می باشد.

جدول (۲) مشخصات جمرها برای شبیه سازی چهارم

مشخصات جمرها	جمر ۱	جمر ۲	جمر ۳
ظرفیت اخلاص	۱	۳	۲
توان جمر (dB)	۱۰	۱۰	۱۰
بهره آنتن جمر (dBi)	۱۰	۱۰	۱۰
پهنای باند جمر (MHz)	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰
افت جمر (dB)	۱	۱	۱
بهره شکل موج جمر	۵	۵	۵

جدول (۳) مشخصات رادارها برای شبیه سازی چهارم

مشخصات رادارها	رادار ۱	رادار ۲	رادار ۳	رادار ۴	رادار ۵	رادار ۶
بهره آنتن رادار (dBi)	۳۳/۵	۳۳/۵	۳۳/۵	۳۳/۵	۳۳/۵	۳۳/۵
پهنای باند رادار (MHz)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
فرکانس کاری رادار (GHz)	۴	۳/۵	۳/۸	۴	۸	۱۲
عدد نویز (dB)	۵	۵	۵	۵	۵	۵
ضرایب تهدید (/)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

مکان جمرها و رادارها در شکل (۱۵) قابل ملاحظه است. در شکل مذکور جمرها با مثلث های آبی رنگ نشان داده شده است و باتوجه به تصادفی بودن مکان رادارها مطابق با توزیع یکنواخت، کمینه فاصله هر رادار تا جمر با ضربدر قرمز رنگ و بیشینه فاصله هر رادار تا جمر با ضربدر مشکی مشخص شده است. دایره های

- Cham, S. Han, L. Ye, and W. Meng, Eds., 2019: Springer International Publishing, pp. 40-51.
- [12] M. Charishma and S. V. S., "Advanced Cell – Averaging Constant False Alarm Rate Method in Homogeneous and Multiple Target Environment," *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 6, no. 1, 2019.
- [13] H.-x. Xing, H. Wu, Y. Chen, and K. Wang, "A cooperative interference resource allocation method based on improved firefly algorithm," *Defence Technology*, 2020.
- [14] Wikipedia contributors. "Optimal design." Wikipedia, The Free Encyclopedia. Wikipedia, The Free Encyclopedia, 5 Jul. 2021. Web. 6 Aug. 2021.
- [15] H. Alimohammady and V. T. Vakili, "A Novel Algorithm for Radar Jamming Resource Allocation," *Electronic and Cyber Defense*, vol. 7, no. 3, 2019.
- [16] Y. K. Chi, "Evaluation of radar performance degradation due to standoff jamming," *Naval Postgraduate School: Monterey, CA, USA*, 1992.
- [17] J. K. a. J. P. Hespanha, "Cooperative Radar Jamming for Groups of Unmanned Air Vehicles," in *Proc. 43rd IEEE Conf. on Decision and Control (CDC)*, Bahamas, pp. 632-637, 2004.
- [18] X. Wang, T. Huang, and Y. Liu, "Resource Allocation for Random Selection of Distributed Jammer Towards Multistatic Radar System," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 29048-29055, 2021.
- [19] S. F. a. B. Bobrovsky, "A Novel Approach to the Burn-Through Range Theory and Applications," *Rec. in IEEE International Radar Conference*, Alexandria, VA, pp. 47-52, 2000.
- [20] B. He, H. Su, and J. Huang, "Joint beamforming and power allocation between a multistatic MIMO radar network and multiple targets using game theoretic analysis," *Digital Signal Processing*, p. 103085, 2021.
- [21] Y. Gao and D.-s. Li, "Electronic Countermeasures Jamming Resource Optimal Distribution," vol. 455, pp. 113-121, 2017.
- [22] B. He and H. Su, "Game Theoretic Countermeasure Analysis for Multistatic Radars and Multiple Jammers," *Radio Science*, vol. 56, no. 5, pp. 1-14, 2021.
- [23] "Functions of Continuous Random Variables." https://www.probabilitycourse.com/chapter4/4_1_3_functions_continuous_var.php (accessed).
- [24] "Functions of Two Continuous Random Variables." https://www.probabilitycourse.com/chapter5/5_2_4_functions.php (accessed).
- [25] Z. Wu, S. Hu, Y. Luo, and X. Li, "Optimal distributed cooperative jamming resource allocation for multi- missile threat scenario," *IET Radar, Sonar & Navigation*, pp. 113-128, 2021.

رادارها فرض مسئله بوده است. نتایج حاکی از آن است که با در نظر گرفتن فرضیات اختصاصی هر نمونه شبیه‌سازی شده، الگوریتم به صورت کامل طبق انتظار عمل نموده و هر جمر مطابق با ظرفیت اخلاقی خود نزدیکترین رادارها را انتخاب نموده است.

۶. مراجع

- [1] C. G. Shi, F. Wang, S. Salous, and J. J. Zhou, "Joint Transmitter Selection and Resource Management Strategy Based on Low Probability of Intercept Optimization for Distributed Radar Networks," *Radio Science*, vol. 53, no. 9, pp. 1108-1134, 2018.
- [2] Z. Li, J. Xie, H. Zhang, H. Xiang, and C. Wang, "Joint beam selection and resource allocation for cognitive multiple targets tracking in MIMO radar with collocated antennas," *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 14, no. 12, pp. 2000-2009, 2020.
- [3] M. J. Ghoreishian, S. M. Hosseini Andargoli, and F. Parvari, "Power allocation in MIMO radars based on LPI optimisation and detection performance fulfilment," *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 14, no. 6, pp. 822-832, 2020.
- [4] X. Wang, T. Huang, and Y. Liu, "Resource Allocation for Random Selection of Distributed Jammer Towards Multistatic Radar System," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 29048-29055, 2021.
- [5] F. Liu, Y. Wang, J. Chen, Q. Wang, and N. Yuan, "Research on Jamming Resource Allocation Technology Based on Improved GAPSO Algorithm," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1738, p. 012075, 2021.
- [6] H. Jiang, Y. Zhang, and H. Xu, "Optimal allocation of cooperative jamming resource based on hybrid quantum- behaved particle swarm optimisation and genetic algorithm," *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 11, no. 1, pp. 185-192, 2017.
- [7] G. Zheng, S. Na, T. Huang, and L. Wang, "A Barrage Jamming Strategy Based on CRB Maximization against Distributed MIMO Radar," *Sensors (Basel)*, vol. 19, no. 11, 2019.
- [8] M. Ma, J. Wu, Y. Shi, L. Yan, and W. Lu, "Research on Multi-aircrafts Cooperative Arraying to Jam Based on Multiobjective Moth-Flame Optimization Algorithm," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 80539-80554, 2022.
- [9] D. L. M. Lv, N. Jiang, and Q. Chen, "Radar Jamming Resources Assignment Algorithm for EW Real-time Decision Support System of Multi-Platforms," presented at the in *International Conf. on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP)*, 2010.
- [10] X. Liu and D. Li, "Analysis of cooperative jamming against pulse compression radar based on CFAR," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* 2018, no. 1, pp. 1-12, 2018.
- [11] J. Ma, B. Shi, F. Che, and S. Zhang, "Research on Evaluation Method of Cooperative Jamming Effect in Cognitive Confrontation," in *Artificial Intelligence for Communications and Networks*,