

## ارائه الگوریتم نوین در تخصیص منابع اختلال راداری

حمزه علیمحمدی<sup>۱</sup>، وحید طباطبائی کیلی<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد، ۲- استاد، دانشکده برق، مخابرات سیستم دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت: ۹۷/۰۴/۲۴، پذیرش: ۹۷/۱۲/۱۴)

### چکیده

صورت مسئله تخصیص بهینه منابع اختلال یکی از موضوعات مورد نیاز در جنگ الکترونیک است. پس از طراحی و تولید انواع اختلالگر، حال این سؤال مطرح است که در یک صحنه نبرد الکترونیکی شامل تعداد زیادی رادار متعلق به نیروهای دشمن، منابع محدود ایجاد اختلال باید به کدامیک از رادارهای دشمن اختصاص یابند. در این راستا، مقاله حاضر به ارائه الگوریتمی نوین جهت تخصیص منابع اختلال در برابر سامانه مکان‌یابی دشمن می‌پردازد. معیار تخصیص منابع اختلال، بیشینگی خطای تخمین می‌باشد. در الگوریتم پیشنهادی، گیرنده‌هایی به‌عنوان قربانی انتخاب می‌گردند که مختل شدن آن‌ها بیشترین سهم را در کاهش دقت تخمین داشته باشند. از کران پایین کرامر-رائو به‌عنوان معیار سنجش خطا در الگوریتم تخصیص منابع اختلال استفاده شده است. پس از اجرای الگوریتم، گیرنده‌های قربانی مشخص شده و ابهام تخصیص مرتفع می‌گردد.

**کلیدواژه‌ها:** تخصیص منابع، سامانه‌های مکان‌یابی، اختلال، CRLB

### ۱- مقدمه

محققین علاوه بر پیشنهاد الگوریتمی جدید مبتنی بر معیارهای ارزیابی میزان اثر بخشی اختلال نظیر توان اختلال، الگوی اختلال و عامل فرکانسی-زمانی-فضایی، به موضوع عدم تناسب بین تعداد اختلالگرها و رادارها و روش مواجهه با آن پرداخته‌اند [۳]. این ملاحظه از این جهت حائز اهمیت است که در هر طرح تخصیص منابع اختلال، فرماندهی عملیات با سه حالت برابری تعداد اختلالگرها و رادارها، بیشتر بودن تعداد رادارها از اختلالگرها و برعکس مواجه خواهد بود. بنابراین، همان‌گونه که بیان شد، هر یک از الگوریتم‌ها با رویکردی مشخص، به دنبال یافتن راه حل برای صورت مسئله تخصیص منابع اختلال راداری می‌باشند.

در همین راستا در مقاله حاضر الگوریتمی نوین جهت استفاده در مسئله تخصیص منابع اختلال در برابر انواع سامانه‌های مکان‌یابی متشکل از چند گیرنده ارائه شده است. در این‌گونه سامانه‌ها، گیرنده‌ها به‌صورت مجزا پارامتر مورد نظر را اندازه‌گیری نموده و سپس با ادغام داده‌ها، مکان هدف تخمین زده می‌شود. مأموریت الگوریتم پیشنهادی، تعیین گیرنده قربانی به نحوی است که متضمن بیشینه شدن خطای تخمین باشد. از کران پایین کرامر-رائو به‌عنوان معیار خطا استفاده شده است. پارامترهای اولیه الگوریتم با توجه به تعداد اهداف مورد حفاظت، ظرفیت اختلال، تعداد گیرنده‌ها و مشخصات سامانه مکان‌یابی تنظیم می‌گردد.

جنگ الکترونیک به سرعت در حال پیشرفت و توسعه است. در کشاکش طرفین مخاصمه، گروهی تفوق می‌یابد که هم از منظر فنی و مسائل تکنیکی و هم از حیث راهبردها و گزینه‌های تاکتیکی برتر باشد. با اذعان به اهمیت شیوه‌های فنی مرتبط با حوزه جنگ الکترونیک، در مقاله حاضر جهت‌گیری به سمت مسائل راهبردی و به‌صورت شفاف‌تر بخش فرماندهی و کنترل می‌باشد. بی‌تردید فرماندهی و کنترل کارآمد جنگ الکترونیک می‌تواند با تخصیص بهینه منابع اختلال، نقش به‌سزایی در موفقیت عملیات داشته باشد. از این‌رو، در این مقاله به موضوع تخصیص منابع اختلال راداری پرداخته شده است.

مسئله تخصیص منابع اختلال راداری سال‌هاست که مورد تحقیق و دقت نظر کارشناسان و محققین حوزه جنگ الکترونیک بوده است. تاکنون الگوریتم‌های مختلفی در قالب سناریوهای مشخص در تلاش برای حل مسئله تخصیص منابع اختلال برآمده‌اند که هر یک از منظرهای خاص، حائز اهمیت هستند. در یکی معیار تصمیم‌سازی کاهش احتمال آشکارسازی مجموعه رادارهای دشمن [۱] و در دیگری معیار مذکور، احتمال سرکوب مبتنی بر فاصله اختلالگر تا رادار می‌باشد [۲]. برخی دیگر از

پس از تعیین گیرنده‌های قربانی توسط الگوریتم پیشنهادی،

\* رایانامه نویسنده مسئول: vakily@iust.ac.ir

سیگنال‌های RF قابل آشکارسازی، امکان شناسایی و مشخص شدن مکان سامانه خودی توسط گیرنده‌های دشمن وجود دارد [۴].

لازمه کسب اطلاع از موقعیت دشمن به صورت محرمانه، استفاده از روش‌های غیرفعال<sup>۱۰</sup> متداولی همچون<sup>۱۱</sup> TOA، TDOA<sup>۱۲</sup>، FDOA<sup>۱۳</sup> و AOA می‌باشد. این روش‌ها به جای انتشار امواج، متکی بر استراق سمع مخابرات دشمن در طیف الکترومغناطیس هستند.

به صورت کلی عملکرد یک سامانه مکان‌یابی در دو مرحله خلاصه می‌شود که عبارتند از: اندازه‌گیری پارامتر توسط هر یک از گیرنده‌ها و ادغام اطلاعات به دست آمده به منظور یافتن موقعیت هدف.

در پژوهش حاضر، مسئله ایجاد اختلال در سامانه مکان‌یابی دشمن مورد نظر واقع شده است. این هدف با تخصیص بهینه اختلالگر به شبکه دشمن متشکل از تعدادی گیرنده تحقق می‌یابد. الگوریتم پیشنهادی تخصیص منابع اختلال از میان گیرنده‌های دشمن که با هدف مکان‌یابی در قالب یک شبکه مشارکت دارند، گیرنده ای را برای ایجاد اختلال انتخاب می‌نماید که با از کار افتادن آن، خطای تخمین مکان‌یابی بیشینه گردد. در این مقاله از میان روش‌های متنوع تخمین موقعیت هدف، بر مکان‌یابی مبتنی بر فاصله<sup>۱۳</sup>، TOA، TDOA و AOA تمرکز شده است.

خطای تخمین مکان‌یابی را می‌توان با معیارهای<sup>۱۴</sup> CRLB و<sup>۱۵</sup> CEP برآورد نمود [۵]. کران پایین خطای کرامر-راو (CRLB)، از منظر واریانس بهترین عملکرد مورد انتظار یک تخمین‌گر را مشخص می‌نماید. احتمال دایره‌ای خطا (CEP) نیز که احتمال واقع شدن یک تحقق تصادفی از یک بردار دو بعدی در دایره‌ای به شعاع معین را در اختیار قرار می‌دهد، دقت سامانه را مشخص می‌نماید. این احتمال که از روی CRLB محاسبه می‌گردد را می‌توان به صورت یک دایره خطا تجسم نمود.

لازم به ذکر است که در پژوهش حاضر از معیار سنجش خطای تخمین CRLB استفاده شده است. بدیهی است که استفاده از معیار مذکور جهت پیشنهاد الگوریتم تخصیص منابع اختلال در برابر یک تخمین‌گر مکان‌یاب، لزوماً به معنای دست‌یابی تخمین‌گر مفروض به کران CRLB نبوده و استفاده از

سامانه‌های ایجاد اختلال با باریک نمودن پرتو خود به سمت آن‌ها، از مشارکت گیرنده‌های مذکور در اندازه‌گیری پارامتر مورد نظر جهت مکان‌یابی هدف جلوگیری می‌کنند. لازم به ذکر است که در حالت کلی استفاده از اختلالگرهایی با آنتن همه‌جهته به جای استفاده از اختلالگرهای با آنتن جهت‌دار، کاهش توان اختلالی رسیده به هر یک از گیرنده‌های دشمن را در پی دارد و این در حالی است که اختلال مؤثر در یک سامانه راداری غیرفعال مستلزم استفاده از توان‌های بسیار بالا می‌باشد. از سوی دیگر اختلالگر همه‌جهته به دلیل تشعشع‌کنندگی در معرض شناسایی و مکان‌یابی توسط سامانه مکان‌یابی دشمن می‌باشد که در نهایت به انهدام آن توسط سامانه‌های پشتیبان دشمن منجر خواهد شد. موضوع نیاز به توان‌های بسیار بالا یکی از نقاط چالش برانگیز طرح میحث ایجاد اختلال در برابر سامانه‌های مکان‌یابی می‌باشد که با پیشنهاد استفاده از اختلالگرهایی با آنتن جهتی و باریک نمودن پرتو اختلالگر، شاید بتوان چالش مورد نظر را تا اندازه‌ای برطرف نمود. به نظر می‌رسد که الگوریتم پیشنهادی با حفظ کلیات، قابل تعمیم به موضوع مکان‌یابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم (WSN)<sup>۱</sup> و همچنین<sup>۲</sup> MIMO رادارها باشد.

در ادامه این متن در بخش ۲، مبانی تحقیق با مدل‌سازی سامانه‌های مکان‌یابی پیش می‌رود. در اینجا سامانه مکان‌یابی مبتنی بر فاصله<sup>۳</sup> هدف تا گیرنده، سامانه مکان‌یابی چندپایه<sup>۴</sup> مبتنی بر زمان ورود سیگنال، سامانه‌های مکان‌یابی مبتنی بر اختلاف زمان ورود<sup>۵</sup> سیگنال و همچنین مبتنی بر زاویه ورود<sup>۶</sup> سیگنال مورد مطالعه قرار گرفته است. سپس در بخش ۳، الگوریتم پیشنهادی تخصیص منابع اختلال در برابر انواع سامانه‌های مکان‌یابی تشریح می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی الگوریتم در قالب سناریوهای مختلف در بخش ۴، ارائه خواهد شد. بخش ۵ نیز به جمع‌بندی نتایج و ارائه پیشنهادات اختصاص یافته است.

## ۲- مدل‌سازی سامانه‌های مکان‌یابی

همان‌گونه که می‌دانیم یکی از کاربردهای رادار، استفاده از آن به منظور شناسایی جهت<sup>۷</sup> تشعشع‌کننده یا موقعیت<sup>۸</sup> آن است. اگرچه سالیان زیادی است که مکان‌یابی هدف به صورت فعال<sup>۹</sup> عملی شده است، اما در روش‌های فعال به دلیل استفاده از

<sup>۱</sup> Wireless Sensor Network

<sup>۲</sup> Multiple Input Multiple Output

<sup>۳</sup> Range Only

<sup>۴</sup> Multistatic Radar

<sup>۵</sup> Time Differences of Arrival

<sup>۶</sup> Angle of Arrival

<sup>۷</sup> Direction Finding

<sup>۸</sup> Position Finding

<sup>۹</sup> Active

<sup>۱۰</sup> Passive

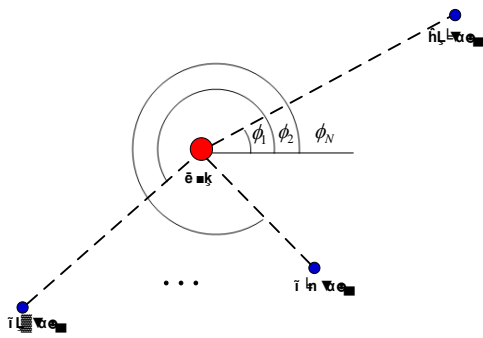
<sup>۱۱</sup> Time of Arrival

<sup>۱۲</sup> Frequency Difference of Arrival

<sup>۱۳</sup> Range

<sup>۱۴</sup> Cramer-Rao Lower Bound

<sup>۱۵</sup> Circular Error Probable



شکل (۲): نمایش زاویه  $\phi_i$

لازم به ذکر است که  $z_i$  ها در رابطه (۱) می‌توانند با هر یک از روش‌های مکان‌یابی TOA, TDOA, AOA, و  $RSS^2$  محاسبه گردند [۶].

سناریو ایجاد اختلال به این شکل است که از میان گیرنده‌های موجود، پرتو اخلاگر را به سمت گیرنده‌ای باریک نموده که با مختل نمودن آن گیرنده، بیشینه اختلال به وجود آید. معیار بهینگی اختلال، بیشینه نمودن خطای تخمین CRLB می‌باشد. واضح است که برای استفاده از رابطه CRLB و یا به صورت معادل برای کار با FIM، می‌بایست اطلاعات لازم در مورد موقعیت گیرنده‌ها و نیز اطلاع از موقعیت هدف مورد نظر گیرنده‌ها که غالباً یکی از سامانه‌های خودی است و همچنین اطلاع از نوع سامانه مکان‌یابی دشمن وجود داشته باشد. در صورت عدم اطلاع دقیق از موقعیت گیرنده‌های دشمن، می‌توان با در نظر گرفتن یک بازه مکانی محتمل با یک تابع چگالی احتمال مشخص، چالش مذکور را پشت سر گذاشت و تحلیل و شبیه‌سازی‌ها را بر اساس آن انجام داد. در اینجا با این فرض که اطلاعات مورد نیاز در دسترس است، طرح تخصیص منابع اختلال ارائه می‌گردد.

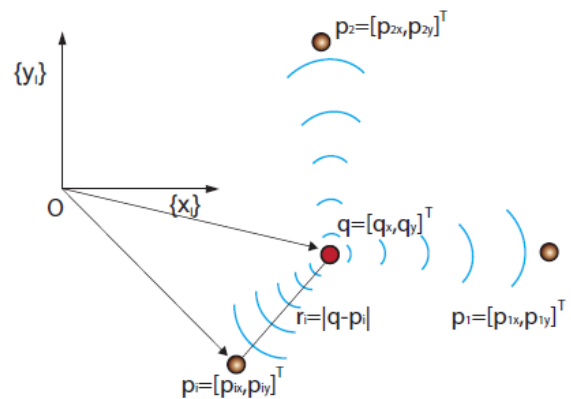
هنگامی که یک مدل آماری بیش از یک پارامتر تخمین دارد، متوسط پارامتر تخمین‌گر عبارت است از یک بردار و واریانس آن یک ماتریس است. در موارد مواجهه با یک ماتریس واریانس، مسئله کمینه سازی واریانس کاری پیچیده است. در این حالت با استفاده از معیارهای بهینگی که مبتنی بر فشرده‌سازی ماتریس اطلاعات هستند، کار را پیش می‌برند. این معیار بهینگی که توابعی از مقادیر ویژه ماتریس اطلاعات FIM (که ماتریس معکوس ماتریس واریانس است) می‌باشند، عبارتند از: A- بهینگی، C- بهینگی، D- بهینگی، E- بهینگی، T- بهینگی [۷]. در اینجا به سه معیار بهینگی A, D و E اشاره شده است.

لازم به ذکر است که در مرجع [۶]، اطلاعاتی در مورد دلیل تمرکز بر روی سه معیار A, D و E از میان انواع معیارهای

CRLB به‌عنوان معیار خطا در الگوریتم مذکور، بیشینه قابلیت تخمین‌گر (هر چند که به آن دست نیابد) را کاهش می‌دهد.

### ۲-۱- سامانه مکان‌یابی مبتنی بر فاصله

در دستگاه مختصات دو بعدی نشان داده شده در شکل (۱)، هدف در نقطه  $q = [q_x, q_y]^T$  و گیرنده‌ها در نقاط  $p_i$  با مختصات  $p_i = [p_{ix}, p_{iy}]^T$  واقع شده‌اند. نماد T بیانگر ترانهاده می‌باشد [۶].



شکل (۱): نمایش موقعیت گیرنده‌ها و هدف در یک سامانه مکان‌یابی [۶]

در اینجا پارامتر اندازه‌گیری، فاصله هدف تا هر یک از گیرنده‌ها می‌باشد که در رابطه (۱) مشخص شده است.

$$z_i = |q - p_i| + \omega_i = r_i(q) + \omega_i \quad (1)$$

$z_i$  فاصله اندازه‌گیری شده،  $r_i(q)$  فاصله واقعی و  $\omega_i$  نویز گاوسی مستقل با متوسط صفر و واریانس  $\sigma^2$  می‌باشد. در مرجع [۶]، پس از مدل‌سازی و تحلیل ریاضی بر اساس رابطه (۱)، FIM<sup>۱</sup> مبتنی بر فاصله به صورت رابطه (۲) به دست آمده است.

$$FIM = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^r \begin{pmatrix} \frac{p_{ix}^2}{r_i^2} & \frac{p_{ix} p_{iy}}{r_i^2} \\ \frac{p_{ix} p_{iy}}{r_i^2} & \frac{p_{iy}^2}{r_i^2} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^r \begin{pmatrix} \cos^2(\phi_i) & \cos(\phi_i) \sin(\phi_i) \\ \cos(\phi_i) \sin(\phi_i) & \sin^2(\phi_i) \end{pmatrix} \quad (2)$$

که در آن، r تعداد گیرنده‌ها را مشخص می‌نماید.  $\phi_i$  نیز زاویه تشکیل شده بین خط وصل هدف تا هر گیرنده و محور x می‌باشد که در شکل (۲) نشان داده شده است.

<sup>2</sup> Received Signal Strength

<sup>1</sup> Fisher Information Matrix

این معیار با بیشینه کردن حداقل مقدار ویژه ماتریس اطلاعات، در واقع بزرگترین قطر بیضی گون اطمینان را تا حد ممکن کوچک می‌سازد. با توجه به موضوع ایجاد اختلال، در رابطه (۵) از مفهوم معکوس یعنی کمینه کردن حداقل مقدار ویژه ماتریس اطلاعات استفاده شده است.

همان‌گونه که اشاره گردید هر یک از معیارهای ذکر شده در بالا، از یک منظر خاص بهینگی را محقق می‌سازند. از آنجا که معیار A- بهینگی مأموریت کمینه‌سازی متوسط واریانس تخمین‌ها را دنبال می‌نماید، در مقاله حاضر از این معیار، به عنوان معیار اصلی استفاده شده است.

با فرض وجود سه گیرنده و یک هدف و با استفاده از معیار بهینگی A (رابطه (۳))، برای سامانه مکان‌یابی مبتنی بر فاصله (رابطه (۲)) کار تحلیل آغاز می‌شود. با به‌کارگیری رابطه (۲)، ماتریس FIM با فرض ایجاد اختلال در گیرنده شماره ۳ به صورت رابطه (۶) نوشته شده است. برای راحتی کار به دلیل بی‌تأثیر بودن  $\sigma^2$  در روند تحلیل، مقدار واحد به آن اختصاص یافته است.

$$FIM = \begin{bmatrix} \cos^2 \phi_1 + \cos^2 \phi_2 & 1/2 \sin 2\phi_1 + 1/2 \sin 2\phi_2 \\ 1/2 \sin 2\phi_1 + 1/2 \sin 2\phi_2 & \sin^2 \phi_1 + \sin^2 \phi_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

استفاده از معیار بهینگی A طبق رابطه (۳)، مستلزم به‌دست آوردن دترمینان و رد  $FIM^{-1}$  است. پس از به‌دست آوردن دترمینان و رد ماتریس FIM و انجام ساده‌سازی‌های مورد نیاز، رابطه (۳) را می‌توان به صورت رابطه (۷) بازنویسی نمود.

$$\begin{aligned} \max_{(p_{1x}, p_{1y}), \dots, (p_{nx}, p_{ny})} Trace(CRLB) &= \\ \max_{(p_{1x}, p_{1y}), \dots, (p_{nx}, p_{ny})} \frac{Trace(FIM)}{|FIM|} &= \\ \max_{(p_{1x}, p_{1y}), \dots, (p_{nx}, p_{ny})} \frac{cte}{\sin^2(\phi_1 - \phi_2)} & \end{aligned} \quad (7)$$

با توجه به رابطه (۷) مشخص می‌گردد که در حالت وجود سه گیرنده، به‌جای محاسبه دترمینان و رد ماتریس FIM، تنها کافی است که مستقیماً یک تابع سینوسی محاسبه گردد. با توجه به این که سینوس در هر ربع مثلثاتی یک‌نوا<sup>۵</sup> می‌باشد، چنانچه هدف مقایسه بین چند مقدار سینوسی در یک ربع واحد باشد، می‌توان به‌جای محاسبه مقادیر سینوسی، آرگومان‌ها را با یکدیگر مقایسه نمود. بنابراین، در اینجا در سه حالت مختلف یعنی با حذف گیرنده اول تا سوم، کافی است پس از حذف یک گیرنده اختلاف زوایا بین دو گیرنده باقیمانده را محاسبه و سپس سه

بهینگی و نیز مقایسه بین سه معیار مذکور وجود دارد.

از منظر معیار بهینگی A، از میان گیرنده‌های موجود، گیرنده‌ای به‌عنوان قربانی انتخاب خواهد شد که رابطه (۳) را اقلان نماید.

$$\begin{aligned} \max_{(p_{1x}, p_{1y}), \dots, (p_{nx}, p_{ny})} Trace(CRLB) &= \\ \max_{(p_{1x}, p_{1y}), \dots, (p_{nx}, p_{ny})} Trace(FIM^{-1}) &= \\ \max_{(p_{1x}, p_{1y}), \dots, (p_{nx}, p_{ny})} \frac{Trace(FIM)}{|FIM|} & \end{aligned} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، زوج مرتب‌های  $(p_{rx}, p_{ry})$  طول و عرض هر یک از گیرنده‌ها در دستگاه دو بعدی هستند. لازم به ذکر است که معیار مذکور، در اصل به کمینه رساندن متوسط واریانس تخمین‌ها منجر می‌شود ولی چون در اینجا هدف ایجاد اختلال است، در رابطه (۳) از مفهوم معکوس یعنی بیشینه‌سازی استفاده شده است.

از منظر معیار بهینگی D، از میان گیرنده‌های موجود، گیرنده‌ای به‌عنوان قربانی انتخاب خواهد شد که رابطه (۴) را اقلان نماید.

$$\begin{aligned} \max_{(p_{1x}, p_{1y}), \dots, (p_{nx}, p_{ny})} |CRLB| &= \\ \max_{(p_{1x}, p_{1y}), \dots, (p_{nx}, p_{ny})} |FIM^{-1}| &= \\ \min_{(p_{1x}, p_{1y}), \dots, (p_{nx}, p_{ny})} |FIM| & \end{aligned} \quad (4)$$

این معیار، به بیشینه رساندن محتوای آنتروپی تفاضلی تخمین‌های پارامتر مورد نظر منجر می‌شود و یا به صورت معادل با بیشینه کردن دترمینان ماتریس اطلاعات، بیضی گون اطمینان را تا حد ممکن کوچک می‌سازد. از آنجا که در اینجا هدف ایجاد اختلال است، در رابطه (۴) از مفهوم معکوس یعنی کمینه‌سازی استفاده شده است. لازم به ذکر است که ناحیه اطمینان<sup>۱</sup> تعمیم چند بعدی فاصله اطمینان<sup>۲</sup> است. این ناحیه مجموعه‌ای از نقاط در یک فضای n بعدی بوده که اغلب به صورت یک حجم بیضوی<sup>۳</sup> پیرامون نقطه تخمین‌زده شده ارائه می‌گردد.

از منظر معیار بهینگی E، از میان گیرنده‌های موجود، گیرنده‌ای به‌عنوان قربانی انتخاب خواهد شد که رابطه (۵) را اقلان نماید.

$$\begin{aligned} \maximize_{(p_{1x}, p_{1y}), \dots, (p_{nx}, p_{ny})} \max(eigenvalues(CRLB)) &= \\ \maximize_{(p_{1x}, p_{1y}), \dots, (p_{nx}, p_{ny})} \max(eigenvalues(FIM^{-1})) &= \\ \minimize_{(p_{1x}, p_{1y}), \dots, (p_{nx}, p_{ny})} \min(eigenvalues(FIM)) & \end{aligned} \quad (5)$$

<sup>4</sup> Trace

<sup>5</sup> monotonic

<sup>1</sup> Confidence Region

<sup>2</sup> Confidence Interval

<sup>3</sup> Ellipsoid

$$f_4 = \frac{1}{\sin^2(\phi_1 - \phi_2) + \sin^2(\phi_1 - \phi_3) + \sin^2(\phi_2 - \phi_3)} \quad (11)$$

مشابه رابطه (۱۱) با فرض حذف سه گیرنده دیگر نیز محاسبه شده و در نهایت گیرنده‌ای به عنوان قربانی انتخاب می‌گردد که رابطه (۱۲) را برآورده سازد.

$$\begin{aligned} \arg \max_{(p_{1x}, p_{1y}), \dots, (p_{rx}, p_{ry})} \text{Trace}(CRLB) = \\ \arg \min_{(p_{1x}, p_{1y}), \dots, (p_{rx}, p_{ry})} (f_1, f_2, f_3, f_4) \end{aligned} \quad (12)$$

با توجه به جامعیت شرایط چهار گیرنده‌ای ( $r = 4$ )، اکنون می‌توان تحلیل را به حالت  $r$  تایی طبق روابط (۱۳) تا (۱۶) تعمیم داد. در حالت  $r$  تایی ابتدا اولین گیرنده حذف شده و اختلاف زوایای دو به دو بین گیرنده‌های باقیمانده (رابطه (۱۳))، محاسبه می‌شود.

$$\phi_{ij} = \phi_i - \phi_j \quad (13)$$

پس از آن نوبت به مرحله جمع سینوس اختلاف زوایا طبق رابطه (۱۴) یا رابطه (۱۵) می‌رسد.

$$f_k = \sum_{i=1}^r \sum_{1 \leq j \leq r} \sin^2(\phi_i - \phi_j) \quad , k = 1, \dots, r \quad (14)$$

$$i \neq k \quad j \neq k, i$$

که در آن،  $\phi_{ij} = \phi_{ji}$  است.

$$\begin{aligned} f_k = \sum_{i=1}^{r-1} \sin^2(\phi_i - \phi_{i+1}) + \\ \sum_{i=1}^{r-2} \sin^2(\phi_i - \phi_{i+2}) + \dots + \sum_{i=1}^{r-(r-1)} \sin^2(\phi_i - \phi_{i+(r-1)}) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\phi_{i,k} = \phi_{k,i} = 0$$

پس از محاسبه مقادیر  $f_1$  تا  $f_r$  در طرح تخصیص منابع، اختلالگر پرتو خود را به سمت گیرنده‌ای باریک می‌نماید که رابطه (۱۶) را اقلان نماید. به عنوان مثال اگر خروجی رابطه (۱۶)  $f_2$  باشد، گیرنده شماره ۲، به عنوان قربانی انتخاب می‌گردد.

$$\begin{aligned} \arg \max_{(p_{1x}, p_{1y}), \dots, (p_{rx}, p_{ry})} \text{Trace}(CRLB) = \\ \arg \min_{(p_{1x}, p_{1y}), \dots, (p_{rx}, p_{ry})} (f_1, \dots, f_r) \end{aligned} \quad (16)$$

لازم به ذکر است که مکان‌یابی مبتنی بر فاصله، کاربردهای بالقوه متعددی در رادار، وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین (UAV)<sup>۱</sup> و موقعیت‌یابی متحرک در سامانه‌های مخابراتی بی‌سیم دارد [۸].

**۲-۲- سامانه مکان‌یابی راداری چندپایه مبتنی بر TOA**  
در سال‌های اخیر مکان‌یابی چندپایه مبتنی بر زمان ورود سیگنال (TOA) توجهات زیادی را به دلیل مزایای عملکردی عرضه شده

اختلاف زاویه به دست آمده را با یکدیگر مقایسه نمود. جهت ایجاد امکان مقایسه بین سه اختلاف زاویه  $\phi_1 - \phi_2$  (حذف گیرنده ۳)،  $\phi_1 - \phi_3$  (حذف گیرنده ۲) و  $\phi_2 - \phi_3$  (حذف گیرنده ۱)، لازم است طبق مجموعه روابط (۸) اندازه اختلاف زوایا به یک ربع واحد نگاشت یابند. در اینجا به صورت دلخواه ربع اول انتخاب شده است.

$$\phi_{12} = \begin{cases} |\phi_1 - \phi_2| & |\phi_1 - \phi_2| \leq \pi/2 \\ \pi - |\phi_1 - \phi_2| & \pi/2 < |\phi_1 - \phi_2| \leq \pi \\ |\phi_1 - \phi_2| - \pi & \pi < |\phi_1 - \phi_2| \leq 3\pi/2 \\ 2\pi - |\phi_1 - \phi_2| & 3\pi/2 < |\phi_1 - \phi_2| < 2\pi \end{cases} \quad (8)$$

از آنجا که در رابطه (۷) مجذور سینوس مورد نظر است، بنابراین، مثبت یا منفی بودن اختلاف زوایا بی‌تأثیر خواهد بود.

در نهایت گیرنده‌ای به عنوان قربانی انتخاب می‌گردد که به مختل نمودن آن، رابطه (۹) اقلان گردد.

$$\begin{aligned} \arg \max_{(p_{1x}, p_{1y}), \dots, (p_{rx}, p_{ry})} \text{Trace}(CRLB) = \\ \arg \min_{(p_{1x}, p_{1y}), \dots, (p_{rx}, p_{ry})} (\phi_{12}, \phi_{13}, \phi_{23}) \end{aligned} \quad (9)$$

که در اینجا تعداد گیرنده‌ها  $r=3$  است. بنابراین، با توجه به رابطه (۹)، ابتدا گیرنده شماره ۱ مختل می‌گردد. زاویه بین گیرنده ۲ و ۳ طبق رابطه (۸) به ربع اول نگاشت یافته و با پارامتر  $\phi_{23}$  مشخص می‌گردد. همین روند با فرض ایجاد اختلال در گیرنده ۲ و ۳ انجام شده و مقادیر  $\phi_{12}$  و  $\phi_{13}$  به دست می‌آید. مقدار کمینه سه پارامتر، مشخص و در نهایت گیرنده‌ای به عنوان خروجی الگوریتم جهت اختلال انتخاب می‌گردد که متناظر با مقدار مذکور باشد.

برای نتیجه‌گیری در حالت  $r$  تایی، روابط با فرض  $r=4$  (مواجهه بودن با چهار گیرنده) و با فرض حذف گیرنده شماره ۴ پیگیری می‌شود. با استفاده از معیار A-بهینگی، با توجه به ثابت بودن رد ماتریس FIM، رابطه (۳) در حالت مبتنی بر فاصله با فرض  $r = 4$  به شکل رابطه (۱۰) درمی‌آید.

$$\max_{(p_{1x}, p_{1y}), \dots, (p_{rx}, p_{ry})} \text{Trace}(CRLB) = \frac{cte}{\max_{(p_{1x}, p_{1y}), \dots, (p_{rx}, p_{ry})} \sin^2(\phi_1 - \phi_2) + \sin^2(\phi_1 - \phi_3) + \sin^2(\phi_2 - \phi_3)} \quad (10)$$

با دقت در رابطه (۱۰)، ملاحظه می‌شود که بیشینه شدن عبارت کسری، در گرو کمینه شدن مخرج کسر می‌باشد. با توجه به توان مرتبه دوم جملات سینوسی، مثبت یا منفی بودن اختلاف زوایا بی‌تأثیر خواهد بود. با برابر یک قرار دادن صورت کسر موجود در رابطه (۱۰) (به دلیل بی‌تأثیر بودن رد FIM در تحلیل)، کسر مذکور به صورت  $f_4$  نام‌گذاری شده است (رابطه (۱۱)).

<sup>1</sup> Unmanned Aerial Vehicles

در نظر گرفته شده است. طبق بیان مرجع [۹]، در مراجع مرتبط با موضوع مکان‌یابی بهینه حسگر<sup>۴</sup>، واریانس خطای ثابت به‌طور گسترده استفاده شده است.

اندازه‌گیری فاصله کلی  $\tilde{d}_i$  از هدف تا فرستنده و  $i$  امین گیرنده می‌تواند به‌صورت رابطه (۱۹) بیان گردد.

$$\tilde{d}_i(\mathbf{p}) = d_i(\mathbf{p}) + n_i \quad (19)$$

که در آن،  $d_i(\mathbf{p})$  به‌صورت رابطه (۲۰) می‌باشد.

$$d_i(\mathbf{p}) = \|\mathbf{p} - \mathbf{t}\| + \|\mathbf{p} - \mathbf{r}_i\| \quad (20)$$

که در آن،  $n_i = ce_i$  در رابطه (۱۹) بیانگر خطای اندازه‌گیری فاصله با  $E\{n_i^2\} = \sigma_i^2$  یعنی  $E\{e_i^2\} = \sigma_i^2 / c^2$  می‌باشد.

با نوشتن معادله اندازه‌گیری فاصله در قالب برداری خواهیم داشت:

$$\tilde{\mathbf{d}} = \mathbf{d}(\mathbf{p}) + \mathbf{n} = [d_1, \dots, d_N]^T + [n_1, \dots, n_N]^T \quad (21)$$

ماتریس کوواریانس اندازه‌گیری فاصله به‌صورت رابطه (۲۲) خواهد بود.

$$\Sigma = E\{\mathbf{nn}^T\} = \text{diag}(\sigma_1^2, \dots, \sigma_N^2) \quad (22)$$

با به‌کارگیری عبارت کلی FIM برای مسائل تخمین گاوسی داریم:

$$FIM = \mathbf{J}_0^T \Sigma^{-1} \mathbf{J}_0 \quad (23)$$

که  $\mathbf{J}_0$  در رابطه (۲۳) ماتریس ژاکوبین  $\mathbf{d}(\mathbf{p})$  (موجود در رابطه (۲۱)) نسبت به  $\mathbf{p}$  ارزیابی شده در مقدار واقعی  $\mathbf{p}$  عبارت است از:

$$\mathbf{J}_0 = \begin{bmatrix} (\mathbf{u}' + \mathbf{u}'_1)^T \\ (\mathbf{u}' + \mathbf{u}'_2)^T \\ \vdots \\ (\mathbf{u}' + \mathbf{u}'_N)^T \end{bmatrix} \quad (24)$$

که در آن،  $\mathbf{u}'_i = [\cos \phi_i, \sin \phi_i]^T$  بردار واحد از گیرنده  $i$  به هدف طبق شکل (۳) می‌باشد که  $\phi_i$  زاویه نسبی گیرنده  $i$  ام است.

با استفاده از روابط (۲۲-۲۴)، FIM یک سامانه مکان‌یابی چندپایه دارای یک فرستنده و چند گیرنده مطابق شکل (۳)، به‌صورت رابطه (۲۵) خواهد بود [۹].

توسط رادار چندپایه به خود جلب کرده است [۹]. در اینجا فرض بر رویارویی با یک سامانه راداری چندپایه دارای یک فرستنده و چند گیرنده مبتنی بر زمان ورود سیگنال است. لازم به ذکر است که مکان‌یابی مبتنی بر TOA خود به دو دسته تقسیم می‌شود که طبق بیان مرجع [۹] عبارتند از TOA دایره‌ای [۱۰-۱۲] و TOA بیضوی [۱۰, ۱۳, ۱۴]. مکان‌یابی مبتنی بر TOA دایره‌ای زمان انتشار سیگنال ارسال شده از یک تشعشع‌کننده به گیرنده‌های غیرفعال را برای تخمین مکان تشعشع‌کننده لحاظ می‌کند. این شیوه همچنین در رادارهای تک‌پایه<sup>۱</sup> شبکه شده به‌کار رفته است. از سوی دیگر مکان‌یابی مبتنی بر TOA بیضوی متکی بر زمان انتشار سیگنال ارسال شده از فرستنده‌ها به هدف و انعکاس یافته از هدف به گیرنده‌ها می‌باشد که این شیوه در شرایطی عملی است که فرستنده‌ها و گیرنده‌ها در مکان‌های متفاوتی مستقر شده باشند. مکان‌یابی بیضوی معمولاً در رادار چندپایه [۱۰]، سونار چندپایه [۱۵] و رادار MIMO با توزیع گسترده<sup>۲</sup> [۱۶-۱۹] به‌کار رفته است.

با در نظر گرفتن یک چینش راداری چندپایه طبق مرجع [۹]، با یک فرستنده و  $N$  گیرنده و یک هدف در یک صفحه دو بعدی مطابق شکل (۳): که در آن  $\mathbf{P} = [p_x, p_y]^T$  موقعیت مجهول هدف برای سامانه مکان‌یابی و  $[x', y']^T$  موقعیت فرستنده و  $\mathbf{r}_i = [x'_i, y'_i]^T$  و  $1 \leq i \leq N$  موقعیت گیرنده  $i$  ام است، مدل مبتنی بر TOA ارائه می‌گردد. دستگاه مختصات شکل (۳): بدون هیچ‌گونه خللی در کلیت مسئله به منظور تنظیم بردار واحد  $\mathbf{u}^T = [1, 0]^T$  از فرستنده به هدف چرخش یافته است تا زاویه نسبی<sup>۳</sup> فرستنده  $\phi' = 0$  رادیان باشد.

اندازه‌گیری TOA به‌دست‌آمده در گیرنده  $i$  ام یعنی  $\tilde{\tau}_i$  به‌صورت رابطه (۱۷) می‌باشد.

$$\tilde{\tau}_i(\mathbf{p}) = \tau_i(\mathbf{p}) + e_i \quad (17)$$

که در آن،  $\tau_i(\mathbf{p})$  عبارت است از:

$$\tau_i(\mathbf{p}) = \frac{\|\mathbf{p} - \mathbf{t}\| + \|\mathbf{p} - \mathbf{r}_i\|}{c} \quad (18)$$

که در رابطه (۱۸)،  $c$  بیانگر سرعت انتشار سیگنال ارسالی، عملگر  $\|\cdot\|$  نرم اقلیدسی،  $e_i$  خطای اندازه‌گیری TOA گیرنده  $i$  ام که به‌صورت نویز گاوسی مستقل با متوسط صفر و واریانس  $E\{e_i^2\}$  در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در اینجا واریانس خطای TOA در گیرنده‌های متفاوت، مختلف

<sup>1</sup> Monostatic

<sup>2</sup> Widely Distributed

<sup>3</sup> Bearing Angle

<sup>4</sup> Optimal Sensor Placement

هذلولی گون می باشد. از تقاطع تعداد کافی هذلولی ها متناسب با ابعاد مسئله و دقت مورد نیاز، موقعیت هدف مشخص می گردد.

$$\sum = \sigma^2 \begin{bmatrix} 1 & 0.5 & \dots & 0.5 \\ 0.5 & 1 & \dots & 0.5 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0.5 & 0.5 & \dots & 1 \end{bmatrix}_{(N-1) \times (N-1)} \quad (27)$$

این همبستگی در اثر تفاضل لحظه های رسیدن سیگنال از یکدیگر ایجاد شده است. FIM به صورت رابطه (۲۸) بیان شده است.

$$FIM_{TDOA} = \mathbf{J}^T(\mathbf{q})_{TDOA} \sum_{TDOA}^{-1} \mathbf{J}(\mathbf{q})_{TDOA} \quad (28)$$

که به صورت رابطه (۲۹) تعریف می گردد.  $\mathbf{J}(\mathbf{q})$  در رابطه (۲۸) بیانگر ژاکوبین مسأله در نقطه  $\mathbf{q}$  است

$$\mathbf{J}(\mathbf{q})_{TDOA} = [\partial / \partial q_x, \partial / \partial q_y] \otimes [d_2(\mathbf{q}), \dots, d_N(\mathbf{q})] \quad (29)$$

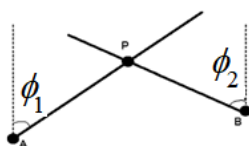
$$= \begin{bmatrix} \frac{q_x - p_{2x}}{r_2} - \frac{q_x - p_{1x}}{r_1} & \frac{q_y - p_{2y}}{r_2} - \frac{q_y - p_{1y}}{r_1} \\ \frac{q_x - p_{3x}}{r_3} - \frac{q_x - p_{1x}}{r_1} & \frac{q_y - p_{3y}}{r_3} - \frac{q_y - p_{1y}}{r_1} \\ \dots & \dots \\ \frac{q_x - p_{Nx}}{r_N} - \frac{q_x - p_{1x}}{r_1} & \frac{q_y - p_{Ny}}{r_N} - \frac{q_y - p_{1y}}{r_1} \end{bmatrix}$$

که،  $r_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) در رابطه (۲۹)، بیان گر فاصله تشعشع کننده (هدف) تا گیرنده  $i$ ام است. همچنین عملگرهای  $\partial / \partial x$  و  $\partial / \partial y$  و  $\otimes$  به ترتیب مشتق نسبت به  $x$ ، مشتق نسبت به  $y$  و عملگر ضرب کرونکر را نشان می دهند.

اطلاعات بیشتر در خصوص روش مکان یابی مبتنی بر TDOA در مرجع [۲۰] و روابط مرتبط برای محاسبه FIM در مراجع هم سو با این روش مکان یابی نظیر مرجع [۲۱] قابل پیگیری است.

### ۲-۴- سامانه مکان یابی مبتنی بر AOA

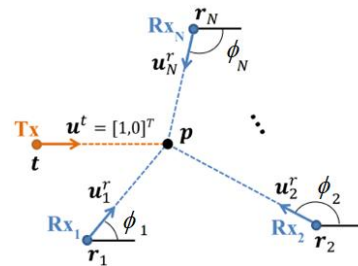
مطابق شکل (۴): در روش مکان یابی با استفاده از زاویه ورود، موقعیت هدف مورد نظر از تقاطع چند جفت از خطوط جهت زاویه ای که توسط گیرنده و هدف ایجاد شده اند، صورت می پذیرد.



شکل (۴): مکان یابی مبتنی بر AOA [۲۲]

$$FIM = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} \begin{bmatrix} (1 + \cos \phi_i)^2 & (1 + \cos \phi_i) \sin \phi_i \\ (1 + \cos \phi_i) \sin \phi_i & \sin^2 \phi_i \end{bmatrix} \quad (25)$$

در رابطه (۲۵) ملاحظه می گردد که فاصله از هدف تا فرستنده و گیرنده ها در FIM واضح نیست. بنابراین، کارایی مکان یابی تنها به زاویه ( $\phi_i$ ) وابسته است.



شکل (۳): سامانه مکان یابی TOA چند پایه با یک فرستنده و چند گیرنده [۹]

### ۲-۳- سامانه مکان یابی مبتنی بر TDOA

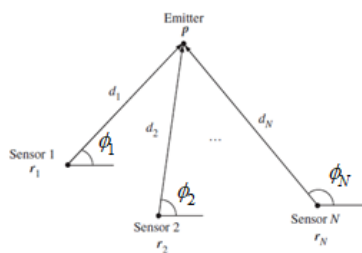
با فرض ایستادن بودن تشعشع کننده، در این بخش تمرکز بر ایجاد اختلال در برابر یک سامانه مکان یابی مبتنی بر اختلاف زمان ورود سیگنال، TDOA می باشد. همان گونه که می دانیم اختلاف زمان ورود از تفاضل زمان رسیدن سیگنال به گیرنده های مختلف به وجود می آید. این حالت از مکان یابی در رادارهای پالسی کارایی دارد. روش مکان یابی مبتنی بر TDOA نیازی به دانستن زمان ارسال سیگنال از هدف نداشته و تنها مستلزم اطلاع از زمان دریافت و سرعت حرکت سیگنال می باشد. هنگامی که سیگنال در دو نقطه مرجع دریافت می گردد، اختلاف زمان ورود می تواند برای محاسبه اختلاف فاصله بین هدف و دو نقطه مرجع استفاده شود.

روابط اختلاف زمان ورود سیگنال با فرض قرار داشتن تشعشع کننده در نقطه  $\mathbf{q} = [q_x, q_y]^T$  با مختصات  $\mathbf{q}$  و گیرنده ها در نقاط  $\mathbf{p}_i = [p_{ix}, p_{iy}]^T$  به شرح روابط (۲۶-۲۹) خواهد بود.

$$d_i = d_i(\mathbf{q}) + n_i = \sqrt{(p_{ix} - q_x)^2 + (p_{iy} - q_y)^2} - \sqrt{(p_{1x} - q_x)^2 + (p_{1y} - q_y)^2} + n_i \quad i = 2, \dots, N \quad (26)$$

که،  $n_i$  نویزهای گاوسی همبسته با ماتریس کوواریانس رابطه (۲۷) خواهند بود. به منظور یافتن مکان هدف، سمت راست رابطه (۲۶) به ازای هر  $i$ ، برابر با حاصل ضرب سرعت نور در اختلاف زمان ورود سیگنال بین نقطه مرجع  $\mathbf{p}_i = [p_{ix}, p_{iy}]^T$  و گیرنده  $i$ ام قرار داده می شود که نتیجه آن تشکیل مکان های هندسی

می‌شود.



شکل (۵): نمایش موقعیت گیرنده‌ها و هدف تشعشی [۲۴]

کران پایین خطای کرامر- راتو در بسیاری از روش‌های تخمین مکان، هنگامی که مکان منبع نسبت به گیرنده‌ها در وضعیت بدی نباشد، قابل حصول است. به‌عنوان نمونه در روش گاوس- نیوتن در صورت همگرایی، دستیابی تقریبی به کران مذکور میسر است. روش‌هایی مانند مکان‌یابی روی گراف تجزیه یا لونبرگ- مارکوت که همگرایی بهتری دارند نیز در نهایت به این کران ختم می‌شوند. بنابراین، CRLB تقریبی مناسب برای نشان دادن خطای مکان‌یابی یک سامانه عملی به حساب می‌آید [۲۳].

لازم به ذکر است که سامانه مکان‌یابی مبتنی‌بر زاویه ورود سیگنال نیز همچون سامانه مکان‌یابی مبتنی‌بر فاصله، دارای کاربردهای بالقوه متعددی در رادار و برخی دیگر از سامانه‌های مخابراتی می‌باشد [۸].

### ۳- الگوریتم پیشنهادی تخصیص منابع اختلال در برابر سامانه‌های مکان‌یابی

در این بخش الگوریتم تخصیص منابع اختلال پیشنهادی معرفی خواهد شد. این الگوریتم در برابر هر سامانه مکان‌یابی اعم از راداری یا غیر راداری قابل استفاده است. در هسته مرکزی این الگوریتم لازم است تابع خطای  $F_i$  محاسبه گردد رابطه (۳۵). همان‌گونه که پیش از این اشاره گردید، معیار خطای تخمین مورد استفاده در این مقاله، کران پایین خطای کرامر- راتو می‌باشد. با توجه به نوع سامانه مکان‌یابی دشمن (TOA, TDOA, AOA، فاصله و یا سایر روش‌ها)، معادل CRLB با معیار بهینگی مورد نظر (A, D, E) و یا سایر معیارها) محاسبه و در قسمت‌های مربوط به تابع  $F_i$  در الگوریتم جایگذاری می‌گردد.

$$F_i \propto CRLB(\mathbf{q}_i) \quad (35)$$

الگوریتم نشان داده شده در شکل (۶) شامل سه حلقه شرطی است که به ترتیب عبارتند از شمارنده تعداد اهداف  $n$ ، شمارنده تعداد گیرنده‌ها  $k$  و شمارنده ظرفیت اختلال  $z$ .

با توجه به شکل (۴): روش AOA حداقل با دو اندازه‌گیری  $\phi_1$  و  $\phi_2$  قادر است موقعیت دو بعدی هدف  $p$  را مشخص نماید. تخمین AOA که غالباً به‌عنوان DF شناخته می‌شود، می‌تواند با آنتن جهتی یا با یک آرایه از آنتن پیاده‌سازی شود [۲۲].

برای یک منبع تشعشع‌کننده واقع در موقعیت دو بعدی  $\mathbf{q} = [q_x, q_y]^T$  و گیرنده‌ها در نقاط  $p_i$  با مختصات  $\mathbf{p}_i = [p_{ix}, p_{iy}]^T$ ،  $(i=1, \dots, N)$  معادله AOA عبارت است از [۲۳]:

$$a_i = \phi_i + n_i = \arctan\left(\frac{p_{ix} - q_x}{p_{iy} - q_y}\right) + n_i, \quad (30)$$

$$i = 2, \dots, N$$

که  $n_i$  نویز گاوسی ناهمبسته با ماتریس کوواریانس بیان شده در رابطه (۳۱) می‌باشد.

$$\Sigma_n = \sigma^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}_{N \times N} \quad (31)$$

ماتریس ژاکوبین  $\mathbf{J}(\mathbf{q})$  در حالت مکان‌یابی به روش AOA با استفاده از رابطه (۳۲) به‌دست می‌آید.

$$\mathbf{J}(\mathbf{q})_{AOA} = [\partial / \partial q_x, \partial / \partial q_y] \otimes [a_1(\mathbf{q}), \dots, a_N(\mathbf{q})] = \begin{bmatrix} -\frac{q_y - p_{1y}}{r_1^2} & \frac{q_x - p_{1x}}{r_1^2} \\ -\frac{q_y - p_{2y}}{r_2^2} & \frac{q_x - p_{2x}}{r_2^2} \\ \dots & \dots \\ -\frac{q_y - p_{Ny}}{r_N^2} & \frac{q_x - p_{Nx}}{r_N^2} \end{bmatrix} \quad (32)$$

که،  $r_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) در رابطه (۳۲)، بیانگر فاصله تشعشع‌کننده (هدف) تا گیرنده  $i$ ام است.

برای مسئله مکان‌یابی مبتنی‌بر زاویه ورود، FIM به‌صورت رابطه (۳۳) خواهد بود [۲۴].

$$FIM_{AOA} = \mathbf{J}^T(\mathbf{q})_{AOA} \Sigma_n^{-1} \mathbf{J}(\mathbf{q})_{AOA} \quad (33)$$

در مرجع [۲۴] معادله نهایی FIM مبتنی‌بر زاویه ورود سیگنال به‌صورت رابطه (۳۴) ارائه شده است.

$$FIM = \frac{1}{\sigma^2} \begin{bmatrix} \sum_i \frac{1}{d_i^2} \sin^2 \phi_i & -\sum_i \frac{1}{d_i^2} \sin \phi_i \cos \phi_i \\ -\sum_i \frac{1}{d_i^2} \sin \phi_i \cos \phi_i & \sum_i \frac{1}{d_i^2} \cos^2 \phi_i \end{bmatrix} \quad (34)$$

تعریف زاویه  $\phi_i$  و فاصله  $d_i$  با توجه به شکل (۵): انجام



ه- در نهایت شماره گیرنده‌های قربانی مشخص می‌شود و الگوریتم جستجو خاتمه می‌یابد.

همان‌گونه که از شکل (۶) و توضیحات فوق مشخص است، الگوریتم پیشنهادی با جستجوی تمام حالات ممکن تخصیص، در هر مرحله گیرنده‌ای را به‌عنوان قربانی انتخاب می‌نماید که از کار افتادن آن، متضمن بیشینه‌شدن خطای تخمین مکان‌یابی باشد. تعداد مراحل اجرای الگوریتم با توجه به ظرفیت اختلال مشخص می‌گردد.

نتیجه شبیه‌سازی الگوریتم در برابر چهار نوع سامانه مکان‌یابی مبتنی بر فاصله، سامانه مکان‌یابی چندپایه مبتنی بر زمان ورود سیگنال، سامانه مکان‌یابی مبتنی بر اختلاف زمان ورود سیگنال و سامانه مکان‌یابی مبتنی بر زاویه ورود سیگنال در قالب سناریوهای متفاوت در بخش ۴۴- ارائه خواهد شد.

#### ۴- شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی

در این بخش به ارائه نتایج شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی (شکل ۶)) در برابر سامانه‌های معرفی شده در بخش ۲ پرداخته خواهد شد. نتایج شبیه‌سازی در قالب سناریوهای مختلف ارائه می‌گردد.

#### ۴-۱- شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی در برابر سامانه

##### مکان‌یابی مبتنی بر فاصله

در این بخش نتایج حاصل شده در قالب هفت سناریو ارائه خواهد شد.

##### □ سناریو ۱

هدف از تعریف این سناریو که با فرضی ساده صورت پذیرفته است، بررسی تطابق نتیجه شبیه‌سازی با تحلیل منطقی می‌باشد.

فرضیات سناریو حاضر به‌صورت زیر است:

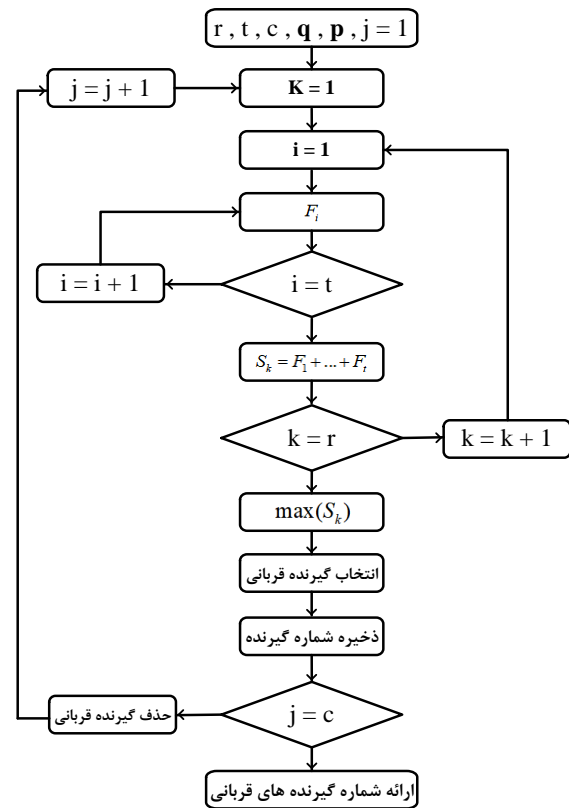
الف- تنها یک هدف که در مبدأ مختصات قرار دارد.

ب- سه گیرنده که در مختصات قطبی  $1430^\circ$ ،  $1460^\circ$  و  $14120^\circ$  واقع‌اند.

ج- سامانه جنگ الکترونیک توانایی ایجاد اختلال در یک گیرنده را داراست.

د- از معیار بهینگی A استفاده شده است.

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود به دلیل مشابهت نسبی زاویه گیرنده‌های ۱ و ۲ نسبت به هدف، این دو گیرنده اندازه‌گیری تقریباً مشابهی از فاصله دارند و گیرنده ۳ است که به دلیل قرار داشتن در زاویه‌ای متمایز، اطلاعات بیشتری از هدف در



شکل (۶): الگوریتم پیشنهادی تخصیص منابع اختلال

مراحل اجرای الگوریتم پیشنهادی تخصیص منابع اختلال نشان داده شده در شکل (۶) به‌صورت زیر است:

الف- ابتدا پارامترهای اولیه مقدردهی می‌شوند. این پارامترها عبارتند از تعداد گیرنده‌ها  $t$ ، تعداد اهداف  $t$ ، ظرفیت اختلال  $c$ ، بردار موقیت اهداف  $q$ ، بردار موقیت گیرنده‌ها  $p$ ، شمارنده تعداد اهداف  $i$ ، شمارنده تعداد گیرنده‌ها  $k$  و شمارنده ظرفیت اختلال  $j$ .

ب- چنانچه بیش از یک هدف موجود باشد، با حذف گیرنده‌ها به‌ترتیب از  $k = 1, \dots, r$  با حضور گیرنده‌های باقیمانده لازم است توابع خطای  $F_i$  ( $i = 1, \dots, t$ ) متناسب با نوع سامانه مکان‌یابی در حلقه شرطی با شمارنده  $i$  محاسبه گردند.

ج- در هر مرحله  $S_k$  ( $k = 1, \dots, r$ ) محاسبه می‌شود و پس از اقصاء حلقه شرطی با شمارنده  $k$ ، حالتی که متناسب با بیشینه  $S_k$  باشد، انتخاب و گیرنده قربانی مشخص می‌گردد. محاسبه  $S_k$  به‌صورت جمع توابع  $F_i$  به دلیل خطی بودن مسئله می‌باشد.

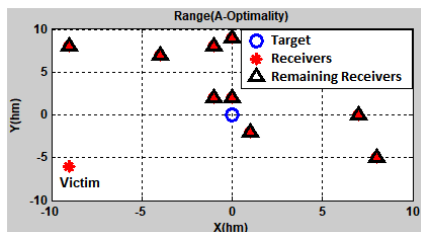
د- چنانچه ظرفیت اختلال بیش از یک باشد، با حذف گیرنده قربانی در هر دور، مراحل سه‌گانه فوق به‌ازای گیرنده‌های باقیمانده تکرار می‌گردد و در هر مرحله شماره گیرنده قربانی به‌دست می‌آید.

است، در شکل (۹): مشخص هستند.

ج- سامانه جنگ الکترونیک توانایی ایجاد اختلال در یک گیرنده را داراست.

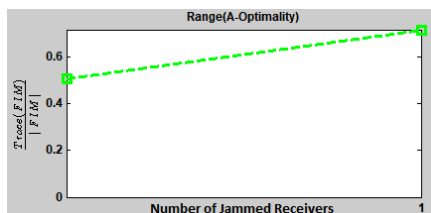
د- از معیار بهینگی A استفاده شده است.

در شکل (۹): واضح است که گیرنده قربانی (Victim) به- عنوان گیرنده‌ای که باید توسط اخلاگر مورد تهاجم قرار گیرد، انتخاب شده است. گیرنده مذکور به دلیل واقع شدن در زاویه مناسب، در بخش ادغام پارامتر اندازه‌گیری شده توسط گیرنده‌های مختلف، اثرگذاری بیشتری نسبت به سایر گیرنده‌ها دارد. بنابراین، واضح است که باید این گیرنده مورد اختلال قرار گیرد.



شکل (۹): نتیجه حاصل از شبیه‌سازی سناریو ۲ با معیار بهینگی A

معادل تغییرات CRLB با معیار بهینگی A در شکل (۱۰): نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در صورت حذف گیرنده قربانی معادل کران پایین خطای کرامر-رائو با معیار بهینگی A حدوداً ۱/۴ برابر می‌شود.



شکل (۱۰): معادل تغییرات CRLB سناریو ۲ با معیار بهینگی A

### □ سناریو ۳

هدف از تعریف این سناریو، نمایش نتایج شبیه‌سازی با فرض افزایش تعداد اهداف است.

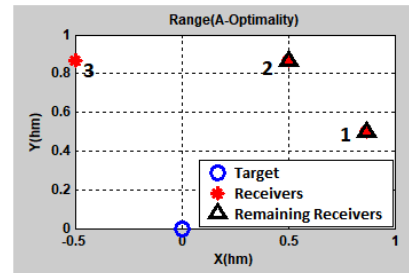
فرضیات سناریو حاضر به صورت زیر است:

الف- حضور پنج هدف که در نقاط تصادفی نشان داده شده در شکل (۱۱): واقع شده‌اند.

ب- ده گیرنده که مکان آن‌ها به صورت تصادفی انتخاب شده است، در شکل (۱۱): مشخص هستند.

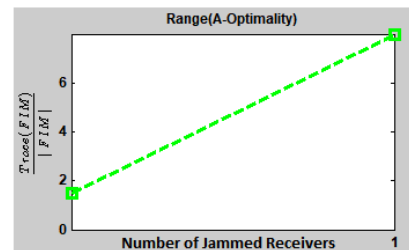
ج- سامانه جنگ الکترونیک توانایی ایجاد اختلال در یک گیرنده را داراست.

اختیارگذاشته و دقت تخمین را افزایش می‌دهد. بنابراین، بدون انجام شبیه‌سازی انتظار این بود که از بین سه گیرنده موجود، گیرنده‌ای به عنوان قربانی انتخاب گردد که در افزایش دقت تخمین نقش مؤثرتری ایفا کند، چرا که با مختل کردن گیرنده با این ویژگی، خطای تخمین بیشتر می‌شود. شکل (۷): که نتیجه شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی تخصیص منابع اختلال است، این انتظار منطقی را تأیید می‌نماید.



شکل (۷): نتیجه حاصل از شبیه‌سازی سناریو ۱ با معیار بهینگی A

معادل تغییرات CRLB با معیار بهینگی A در شکل (۸): نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در صورت حذف گیرنده شماره ۳، معادل کران پایین خطای کرامر-رائو با معیار بهینگی A حدوداً ۴/۵ برابر می‌شود.



شکل (۸): معادل تغییرات CRLB سناریو ۱ با معیار بهینگی A

لازم به ذکر است که در بخش حاضر نمایش تغییرات معادل CRLB به ازای معیارهای بهینگی مختلف، صرفاً روند صعودی یا نزولی تغییرات معادل CRLB را به‌ازای مختل شدن هر یک از گیرنده‌ها به تصویر می‌کشد. با توجه به روابط (۳-۵) معادل تغییرات CRLB با معیار بهینگی A، صعودی و با معیارهای بهینگی D و E نزولی می‌باشد.

### □ سناریو ۲

هدف از تعریف این سناریو، نمایش نتایج شبیه‌سازی با فرض افزایش تعداد گیرنده‌ها می‌باشد.

فرضیات سناریو حاضر به صورت زیر است:

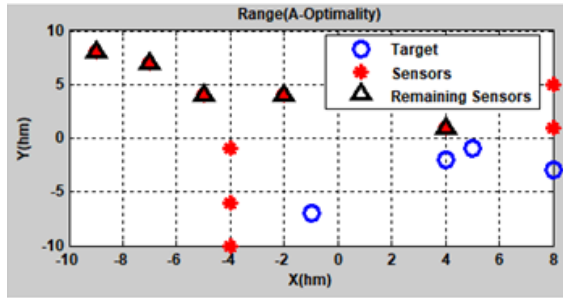
الف- تنها یک هدف که در مبدأ مختصات قرار دارد.

ب- ده گیرنده که مکان آن‌ها به صورت تصادفی انتخاب شده

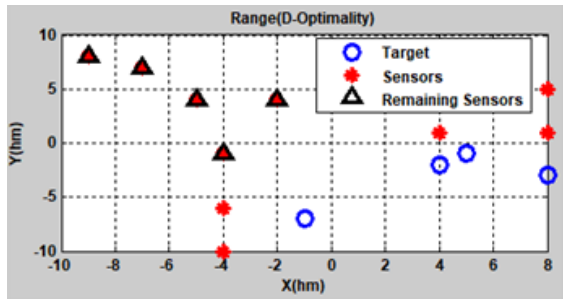
است، در شکل (۱۳): مشخص هستند.

ج- سامانه جنگ الکترونیک توانایی ایجاد اختلال در پنج گیرنده را داراست.

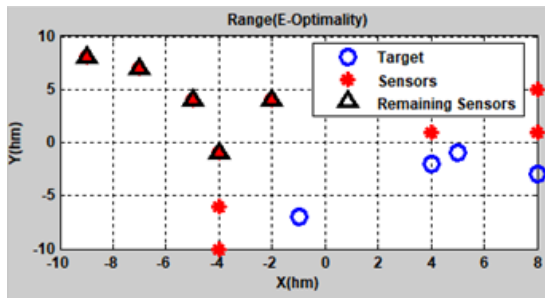
نتیجه اجرای الگوریتم با فرضیات سناریو ۴ با سه معیار بهیمنی A، D و E در شکل (۱۳): نشان داده شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

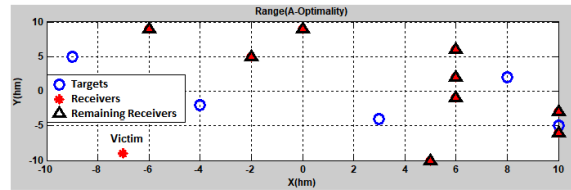
شکل (۱۳): نتیجه حاصل از شبیه‌سازی سناریو ۴، (الف) معیار بهیمنی A، (ب) معیار بهیمنی D و (ج) معیار بهیمنی E

در شکل (۱۳): ملاحظه می‌شود که چهار گیرنده از پنج ظرفیت ایجاد اختلال در هر سه معیار بهیمنی به صورت مشابه انتخاب شده‌اند. خروجی‌های نسبتاً مشابه به ازای معیارهای بهیمنی A، D و E، به دلیل ماهیت نسبتاً مشابه معیارهای مذکور است.

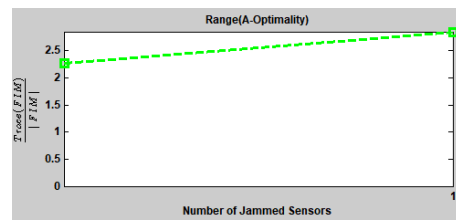
معادل تغییرات CRLB متناظر با شکل (۱۳): در شکل (۱۴) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در صورت ایجاد اختلال مؤثر در گیرنده‌های مشخص شده در شکل (۱۳)، معادل

د- از معیار بهیمنی A استفاده شده است.

مطابق با فرضیات سناریوی حاضر چنانچه تعداد اهداف بیش از یک مورد باشد، گیرنده قربانی وابسته به مکان تمامی اهداف تعیین می‌گردد. همانگونه که در بخش ۳ ذیل توضیح شکل (۶) بیان شد، با توجه به این‌که گیرنده‌های دشمن به صورت مجزا مکان هر یک از اهداف را تخمین می‌زنند، معیار خطا به صورت جمع خطای تخمین مکان هر یک از اهداف درمی‌آید [۶]. بنابراین، هر یک از اهداف با افزودن مقدار خطای متناظر در تابع مذکور، با توجه به مکان خود و نیز مکان گیرنده‌های دشمن در تعیین گیرنده قربانی اثرگذار خواهند بود. در صورت مواجهه با انبوهی از اهداف، تحلیلی مشابه قابل ارائه است، با این تفاوت که در این شرایط محاسبه تابع خطا به صورت مجموع خطای تخمین هر یک از اهداف زمانبرتر و در نتیجه خروجی الگوریتم با صرف زمان بیشتری به دست خواهد آمد. نتیجه اجرای الگوریتم با فرضیات سناریو ۳ در شکل (۱۱): نشان داده شده است.



شکل (۱۱): نتیجه حاصل از شبیه‌سازی سناریو ۳ با معیار بهیمنی A معادل تغییرات CRLB با معیار بهیمنی A در شکل (۱۲): نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در صورت خارج کردن گیرنده قربانی از مدار، معادل کران پایین خطای کران-رائو با معیار بهیمنی A حدوداً ۱/۳ برابر می‌شود.



شکل (۱۲): معادل تغییرات CRLB سناریو ۳ با معیار بهیمنی A

#### سناریو ۴ □

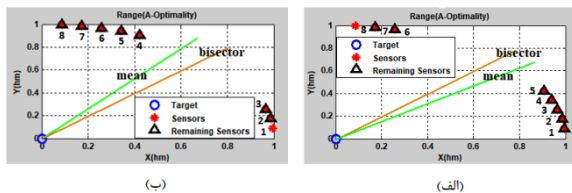
هدف از تعریف این سناریو، بررسی نتایج شبیه‌سازی با فرض افزایش ظرفیت اختلال می‌باشد.

فرضیات سناریو حاضر به صورت زیر است:

الف- حضور چهار هدف که در نقاط تصادفی نشان داده شده در شکل (۱۳): واقع شده‌اند.

ب- ده گیرنده که مکان آن‌ها به صورت تصادفی انتخاب شده

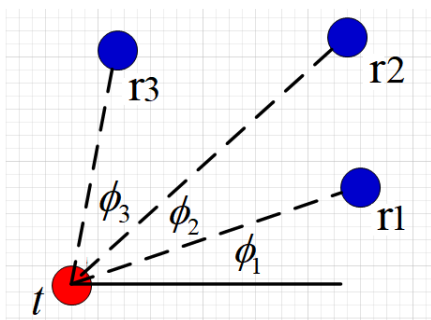
مقدار دلخواه معتبر خواهد بود. لازم به ذکر است که زاویه بین خط mean با محور افقی در چینش (الف)  $37/5^\circ$ ، و در چینش (ب)  $52/5^\circ$  می‌باشد. زاویه بین خط bisector با محور افقی نیز در هر دو چینش  $45^\circ$  می‌باشد. در چینش (الف) شکل (۱۵) حذف گیرنده انتهایی با شرایط بیان شده از حیث مفهومی مورد انتظار بود، چرا که اولاً حالت کمینه در رابطه (۱۶) با حذف هیچ یک از گیرنده‌های میانی رخ نمی‌دهد و ثانیاً به دلیل تجمع اکثر گیرنده‌ها به سمت گیرنده ۱، حذف گیرنده کناری ۱ متناظر با ایجاد بیشترین میزان خطای تخمین نبوده و تناظر مذکور با حذف گیرنده کناری دیگر (گیرنده ۸) بوجود می‌آید. در تطابق کامل با تحلیل فوق، در چینش (ب) شکل (۱۵) به دلیل تجمع اکثر گیرنده‌ها به سمت گیرنده ۸، انتظار می‌رود که حذف گیرنده کناری ۱ متناظر با ایجاد بیشترین میزان خطای تخمین باشد، که همین امر روی داده است.



شکل (۱۵): نتیجه حاصل از شبیه‌سازی سناریو ۵ با معیار بهینگی A (الف) چینش اول و (ب) چینش دوم

### سناریو ۶ □

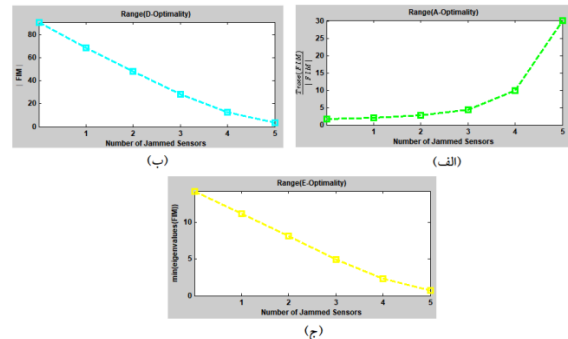
هدف از تعریف این سناریو ارائه مبحثی تحلیلی در مورد تخصیص منابع اختلال در برابر سامانه مکان‌یابی مبتنی بر فاصله است که در آن چینش سه گیرنده متعلق به نیروهای دشمن نسبت به هدف با شرط  $0 \leq \phi_1, \phi_2, \phi_3 \leq \frac{\pi}{2}$  همراه باشد (شکل (۱۶)).



شکل (۱۶): موقعیت گیرنده‌ها و هدف در سناریو ۶

بدون ایجاد نقیصی در کلیت مسئله، جهت سهولت تحلیل ابتدا زاویه  $\phi_1$  را صفر در نظر گرفته و سپس زاویه مذکور به صورت پارامتر وارد تحلیل می‌گردد. همچنین فرض دیگر این‌که داشته باشیم:  $\phi_1 \leq \phi_2 \leq \phi_3$ . با فرضیات مطرح شده طبق رابطه (۹) خواهیم داشت:

تغییرات CRLB با معیار بهینگی A بیش از ۱۷ برابر افزایش و با معیار بهینگی D و E به ترتیب با نسبت بیش از ۲۵ برابری و بیش از ۱۹ برابری کاهش می‌یابد.



شکل (۱۴): معادل تغییرات CRLB سناریو ۴ (الف) معیار بهینگی A، (ب) معیار بهینگی D و (ج) معیار بهینگی E

### سناریو ۵ □

هدف از تعریف این سناریو، تبیین حالتی خاص است که در آن چینش گیرنده‌ها به گونه‌ای است که همگی آن‌ها در یک ربع مثلثاتی قرار دارند.

فرضیات سناریو حاضر به صورت زیر است:

الف- حضور یک هدف که در مبدأ مختصات قرار دارد.

ب- هشت گیرنده که به ترتیب از شماره یک تا هشت در چینش (الف) شکل (۱۵) در نقاط  $14/5^\circ, 14/10^\circ, 14/5^\circ$  و در چینش (ب) شکل مذکور در نقاط  $14/20^\circ, 14/25^\circ, 14/75^\circ$  و  $14/80^\circ$  و  $14/85^\circ$  واقع شده‌اند. گیرنده‌های دو تا هفت در هر دو حالت شکل (۱۵) گیرنده‌های میانی و گیرنده‌های یک و هشت گیرنده‌های کناری هستند.

ج- سامانه جنگ الکترونیک توانایی ایجاد اختلال در یک گیرنده را داراست.

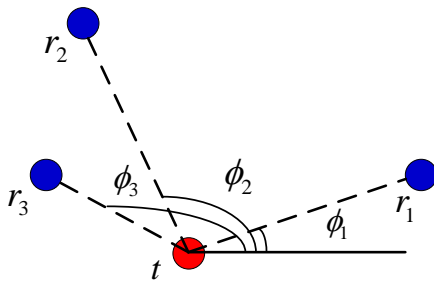
د- از معیار بهینگی A استفاده شده است.

نتیجه شبیه‌سازی مطابق شکل (۱۵) نشان می‌دهد که چنانچه با مرکزیت هدف، تمامی گیرنده‌ها در یک ربع مثلثاتی واقع شده باشند، گیرنده قربانی همواره یکی از دو گیرنده کناری (در اینجا گیرنده ۱ یا ۸) خواهد بود. اگر متوسط زوایای  $\phi_i$  گیرنده‌های میانی (زاویه بین خط mean با محور افقی) از نیمساز زوایای گیرنده‌های کناری (زاویه بین خط bisector با محور افقی) کوچکتر باشد، گیرنده انتهایی (گیرنده ۸) حذف می‌شود و برعکس. مطلب فوق در صورت چرخش هماهنگ گیرنده‌ها به هر

شکل (۱۷) داشته باشیم:  $\phi_1 = 10^\circ$ ،  $\phi_2 = 45^\circ$  و  $\phi_3 = 60^\circ$ ، در این صورت حالت  $\phi_3 \leq 2\phi_2 - \phi_1$  رخ می‌دهد که طبق رابطه (۳۸) باید گیرنده شماره ۱ حذف گردد. ملاحظه می‌شود که چینش (ب) در شکل (۱۷) همین مطلب را تأیید می‌کند.

□ سناریو ۷

در این سناریو تحلیلی هم‌راستا با تحلیل صورت گرفته در سناریو ۶، اما با فرضیاتی دیگر ارائه می‌گردد. در اینجا فرض مواجهه با یک سامانه مکان‌یابی مبتنی بر فاصله، وجود یک هدف در مبدأ و سه گیرنده در مکان‌هایی با اقناع شرایط  $\frac{\pi}{2} \leq \phi_2, \phi_3 \leq \pi$  و  $\phi_1 \leq \phi_2 \leq \phi_3$  کار تحلیل آغاز می‌شود (شکل (۱۸)).



شکل (۱۸): موقعیت گیرنده‌ها و هدف در سناریو ۷

مشابه سناریو ۶ ابتدا  $\phi_1$  صفر فرض و سپس در معادلات وارد می‌شود.

با توجه به فرضیات مذکور و همچنین رابطه (۹) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \min(\phi_2 - \phi_1, \phi_3 - \phi_2, \phi_3 - \phi_1) &= \\ \min(\phi_3 - \phi_2, \pi - \phi_3) &= \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{cases} \pi - \phi_3 & \phi_3 - \phi_2 \geq \pi - \phi_3 \\ \phi_3 - \phi_2 & \phi_3 - \phi_2 < \pi - \phi_3 \end{cases}$$

با وارد نمودن  $\phi_1$  در معادله اخیر داریم:

$$\begin{aligned} \min(\phi_2 - \phi_1, \phi_3 - \phi_2, \phi_3 - \phi_1) &= \\ \begin{cases} \pi - (\phi_3 - \phi_1) & \phi_3 - \phi_1 - (\phi_2 - \phi_1) \geq \pi - (\phi_3 - \phi_1) \\ \phi_3 - \phi_1 - (\phi_2 - \phi_1) & \phi_3 - \phi_1 - (\phi_2 - \phi_1) < \pi - (\phi_3 - \phi_1) \end{cases} \end{aligned} \quad (40)$$

و در نهایت خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \min(\phi_2 - \phi_1, \phi_3 - \phi_2, \phi_3 - \phi_1) &= \\ \begin{cases} \pi - (\phi_3 - \phi_1) & \phi_3 \geq \frac{\pi + \phi_2 + \phi_1}{2} \\ \phi_3 - \phi_2 & \phi_3 < \frac{\pi + \phi_2 + \phi_1}{2} \end{cases} \end{aligned} \quad (41)$$

به‌عنوان مثال، چنانچه هدف در مبدأ مختصات و زاویه  $\phi_1$  مربوط به گیرنده اول،  $10^\circ$  و زاویه  $\phi_2$  مربوط به گیرنده دوم  $100^\circ$

$$\begin{aligned} \min(\phi_2 - \phi_1, \phi_3 - \phi_2, \phi_3 - \phi_1) &= \\ \min(\phi_2, \phi_3 - \phi_2) &= \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{cases} \phi_2 & \phi_3 - \phi_2 > \phi_2 \\ \phi_3 - \phi_2 & \phi_3 - \phi_2 \leq \phi_2 \end{cases}$$

حال با وارد نمودن  $\phi_1$  در سمت راست معادله اخیر داریم:

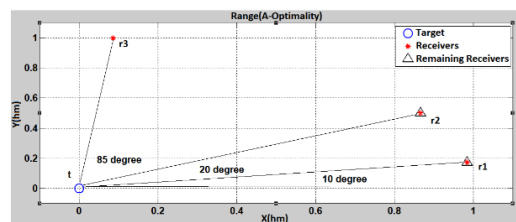
$$\begin{aligned} \min(\phi_2 - \phi_1, \phi_3 - \phi_2, \phi_3 - \phi_1) &= \\ \begin{cases} \phi_2 - \phi_1 & (\phi_3 - \phi_1) - (\phi_2 - \phi_1) > \phi_2 - \phi_1 \\ \phi_3 - \phi_1 - (\phi_2 - \phi_1) & \phi_3 - \phi_1 - (\phi_2 - \phi_1) \leq \phi_2 - \phi_1 \end{cases} \end{aligned} \quad (37)$$

که خواهیم داشت:

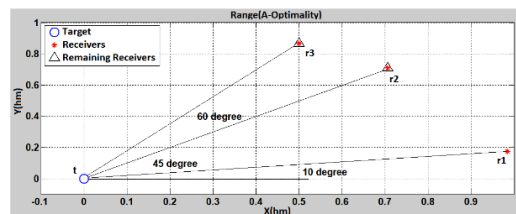
$$\begin{aligned} \min(\phi_2 - \phi_1, \phi_3 - \phi_2, \phi_3 - \phi_1) &= \\ \begin{cases} \phi_2 - \phi_1 & \phi_3 > 2\phi_2 - \phi_1 \\ \phi_3 - \phi_2 & \phi_3 \leq 2\phi_2 - \phi_1 \end{cases} \end{aligned} \quad (38)$$

این نتایج با فرض  $0 \leq \phi_1, \phi_2, \phi_3 \leq \frac{\pi}{2}$  و  $\phi_1 \leq \phi_2 \leq \phi_3$  حاصل شده است. رابطه (۳۸) به این معناست که چنانچه  $\phi_3 > 2\phi_2 - \phi_1$  باشد، گیرنده شماره ۳ باید حذف گردد و در صورتی که  $\phi_3 \leq 2\phi_2 - \phi_1$  باشد، گیرنده شماره ۱ حذف خواهد شد.

به‌عنوان مثال، چنانچه هدف در مبدأ مختصات و گیرنده‌ها در نقاط نشان‌داده‌شده در چینش (الف) شکل (۱۷) واقع باشند، خواهیم داشت:  $\phi_1 = 10^\circ$ ،  $\phi_2 = 20^\circ$  و  $\phi_3 = 85^\circ$ . از آنجا که حالت  $\phi_3 > 2\phi_2 - \phi_1$  رخ داده است، بنابراین، طبق تحلیل صورت گرفته باید گیرنده شماره ۳ حذف گردد که چینش (الف) در شکل (۱۷) مؤید همین مطلب است.



(الف)



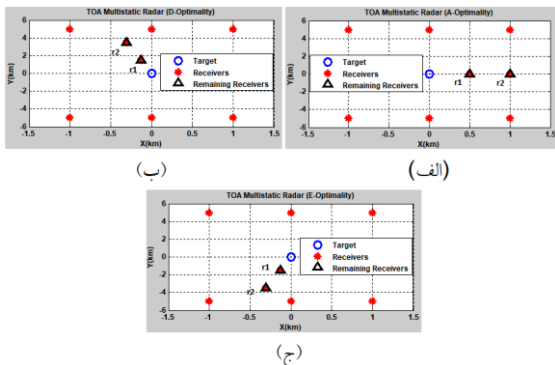
(ب)

شکل (۱۷): نتیجه شبیه‌سازی سناریو ۶ با معیار بهینگی A

(الف) چینش اول و (ب) چینش دوم

حال اگر چینش گیرنده‌ها تغییر یابد و مطابق چینش (ب) در

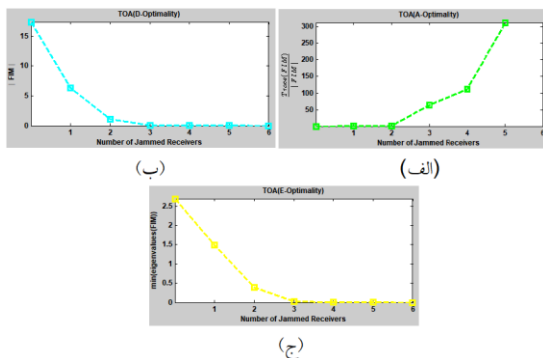
می‌دهند. ملاحظه می‌شود که در هر سه چینش (الف)، (ب) و (ج) در شکل ۲۰، دو گیرنده  $r_1$  و  $r_2$  به دلیل قرار داشتن در زاویه یکسان نسبت به هدف (در اختیار قرار دادن اطلاعات مشابه به مرکز ادغام داده)، پس از اجرای الگوریتم با هیچ یک از معیارهای بهینگی به‌عنوان گیرنده قربانی انتخاب نشده‌اند. در حالت‌های موجود در شکل ۲۰، موضوع عدم وابستگی کارایی سامانه مکان‌یابی چندپایه مبتنی بر TOA، به فاصله بین گیرنده‌ها تا هدف و اتکاء آن صرفاً به زاویه به وضوح مشخص است. ملاحظه می‌گردد با این‌که گیرنده  $r_1$  در تمامی چینش‌های (الف)، (ب) و (ج) در فاصله نزدیکتری از سایر گیرنده‌ها نسبت به هدف قرار دارد، اما به دلیل وجود گیرنده دیگر ( $r_2$ ) هم‌راستا با گیرنده مذکور ( $r_1$ )، از آنجا که اطلاعات این دو گیرنده از منظر زاویه مشابه می‌باشد، این گیرنده به‌عنوان قربانی انتخاب نشده است و گیرنده‌هایی به‌عنوان قربانی توسط الگوریتم پیشنهادی تخصیص منابع اختلال انتخاب شده‌اند که اطلاعات بیشتری از حیث زاویه در اختیار سامانه ادغام داده قرار دهند (به توجه به رابطه ۲۵).



شکل ۲۰: نتیجه شبیه‌سازی سناریو ۸ (الف) معیار بهینگی A،

(ب) معیار بهینگی D و (ج) معیار بهینگی E

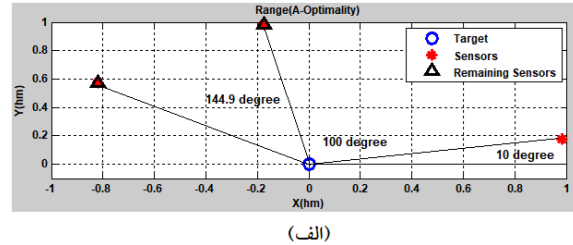
معادل تغییرات CRLB متناظر با شکل ۲۰ در شکل ۲۱) نشان داده شده است.



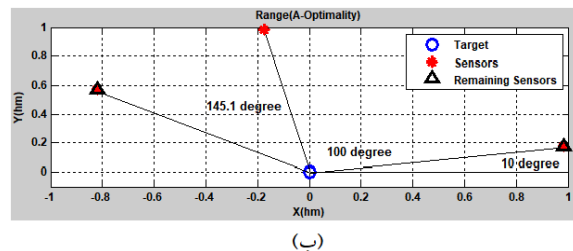
شکل ۲۱: معادل تغییرات CRLB سناریو ۸ (الف) معیار بهینگی A،

(ب) معیار بهینگی D و (ج) معیار بهینگی E

باشد، طبق رابطه (۴۱) چنانچه زاویه  $\phi_3$  مربوط به گیرنده سوم کوچکتر از  $145^\circ$  باشد، گیرنده اول حذف (چینش (الف) در شکل ۱۹)) و در صورت بزرگتر یا مساوی بودن  $\phi_3$  از مقدار مذکور، گیرنده دوم حذف می‌گردد (چینش (ب) در شکل ۱۹)).



(الف)



(ب)

شکل ۱۹: نتیجه شبیه‌سازی سناریوی ۷ با معیار بهینگی A

(الف) چینش اول و (ب) چینش دوم

## ۲-۴- شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی در برابر

### سامانه مکان‌یابی چندپایه مبتنی بر TOA

در این بخش نتایج حاصل شده در قالب یک سناریو بیان می‌گردد.

#### سناریو ۸ □

هدف از تعریف این سناریو نمایش عدم وابستگی نتایج الگوریتم پیشنهادی تخصیص منابع اختلال در برابر سامانه مکان‌یابی چندپایه مبتنی بر TOA، به فاصله بین گیرنده‌ها و اتکاء آن صرفاً به زاویه گیرنده‌ها نسبت به هدف می‌باشد (به دلیل رابطه ۲۵).

فرضیات سناریو حاضر به صورت زیر است:

الف- یک هدف که در مبدأ مختصات واقع است.

ب- هشت گیرنده که در نقاط نشان داده شده در سه چینش شکل ۲۰ واقع‌اند.

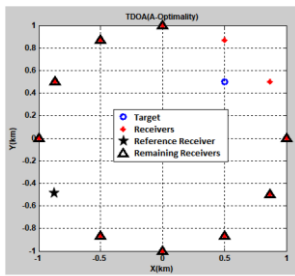
ج- سامانه جنگ الکترونیک توانایی ایجاد اختلال در شش گیرنده را داراست.

همان‌گونه که در سه حالت موجود در شکل ۲۰ مشخص است، گیرنده‌هایی به‌عنوان قربانی انتخاب شده‌اند که به دلیل قرار گرفتن در زاویه مناسب، بیشترین اطلاعات را در اختیار بخش ادغام داده سامانه مکان‌یابی چندپایه مبتنی بر TOA قرار

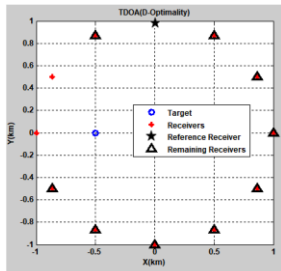
### ۳-۴- شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی در برابر سامانه مکان‌یابی مبتنی بر TDOA

در این بخش نتایج حاصل شده در قالب یک سناریو ارائه می‌گردد.

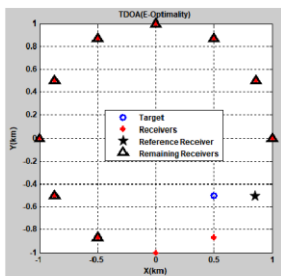
□ سناریو ۹



(الف)

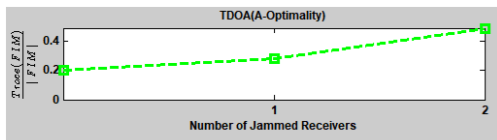


(ب)

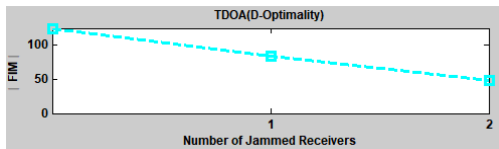


(ج)

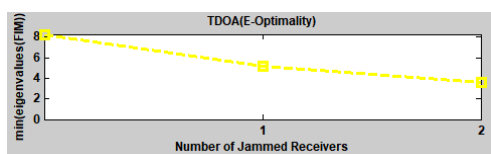
شکل (۲۲): نتیجه شبیه‌سازی سناریو ۹ (الف) معیار بهیجی A (ب) معیار بهیجی D و (ج) معیار بهیجی E



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۲۳): معادل تغییرات CRLB سناریو ۹ (الف) معیار بهیجی A (ب) معیار بهیجی D و (ج) معیار بهیجی E

هدف از تعریف این سناریو بررسی اجمالی در خصوص عوامل مؤثر در تعیین گیرنده قربانی توسط الگوریتم تخصیص منابع اختلال در برابر یک سامانه مکان‌یابی راداری مبتنی بر اختلاف زمان ورود سیگنال (TDOA) می‌باشد.

فرضیات سناریو حاضر به صورت زیر است:

الف- یک هدف که در هر یک از سه چینش شکل (۲۲) در نقطه متمایزی واقع شده است.

ب- دوازده گیرنده که مطابق تصویر نشان داده شده در شکل (۲۲) به صورت دایروی حول هدف چیده شده‌اند.

ج- سامانه جنگ الکترونیک توانایی ایجاد اختلال در دو گیرنده را داراست.

د- گیرنده مرجع در تمامی چینش‌های موجود در شکل (۲۲) با نماد ستاره مشخص شده است.

همان‌گونه که در شکل (۲۲) ملاحظه می‌شود، تفاوت سه چینش (الف)، (ب) و (ج) در انتخاب نقطه مرجع و نیز تغییر در محل هدف می‌باشد. همچنین هر یک از سه چینش با یکی از معیارهای بهیجی شبیه‌سازی شده است. با توجه به این‌که در روش TDOA نیاز به یک گیرنده مرجع وجود دارد، تصمیم‌گیری در خصوص گیرنده قربانی تابعی است از مکان گیرنده مرجع، هدف و سایر گیرنده‌ها.

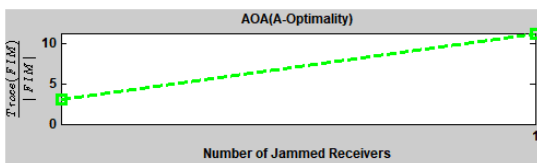
معادل تغییرات CRLB متناظر با شکل (۲۲) در شکل (۲۳) نشان داده شده است. همچنین نسبت تغییرات مقادیر معادل CRLB با سه معیار بهیجی A، D و E متناظر با شکل (۲۳) در جدول (۱) مشخص شده است.

جدول (۱): نسبت تغییرات معادل CRLB سناریو ۹ با سه معیار بهیجی

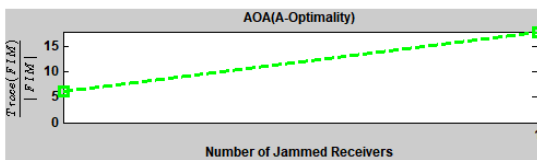
وضعیت	نوع معیار بهیجی		
	E	D	A
پیش از اجرای الگوریتم	۸/۲۷۸	۱۲۴/۸	۰/۲۰۲۹
پس از ایجاد اختلال در گیرنده اول	۵/۲	۸۳/۳۱	۰/۲۷۸۷
پس از ایجاد اختلال در گیرنده دوم	۲/۵۸۷	۴۸/۸۶	۰/۴۸۸۲
نسبت تغییرات	↓ ۰/۴۳	↓ ۰/۳۹	↑ ۲/۴

شماره ۱ و ۲ همچنان در همسایگی یکدیگر هستند و ثانیاً گیرنده شماره ۳ همچنان در زاویه  $135^\circ$  واقع است، اما گیرنده مذکور به دلیل تغییر مکان از نقطه (۱،۱) به نقطه (۲،۲) در فاصله دورتری نسبت به هدف قرار می‌گیرد که همین امر منجر به کاهش اهمیت اطلاعات گیرنده شماره ۳ در مکان‌یابی هدف و انتخاب گیرنده شماره ۱ به‌عنوان گیرنده قربانی شده است.

معادل تغییرات CRLB با معیار بهینگی A متناظر با دو چینش شکل (۲۴) در (۲۵) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که معادل تغییرات CRLB در هر دو چینش شکل (۲۵) افزایشی سه برابری را تجربه کرده است.



(الف)



(ب)

شکل (۲۵): معادل تغییرات CRLB سناریو ۱۰ با معیار بهینگی A (الف) چینش اول و (ب) چینش دوم

### ۵- نتیجه‌گیری

با توجه به مطالب ارائه‌شده در متن حاضر، به‌طور کلی می‌توان ادعا نمود که مسئله تخصیص منابع اختلال در برابر سامانه‌های مکان‌یابی به این نقطه ختم می‌شود که از بین گیرنده‌ها، موردی به‌عنوان قربانی در معرض اختلال قرار می‌گیرد که با توجه به موقعیت جغرافیایی خود، بیشترین سهم را در افزایش دقت تخمین داشته باشد.

از میان گیرنده‌های موجود، گیرنده‌ای دارای اطلاعات با ارزش‌تری است که در مکان جداگانه‌ای از سایر گیرنده‌ها قرار گرفته باشد. مکان مذکور با توجه به نوع وابستگی تابع FIM به یک یا چند متغیر مشخص، متناظر با نوع سامانه مکان‌یابی تعیین می‌گردد. در سامانه‌های مکان‌یابی بررسی شده، عمدتاً وابستگی FIM صرفاً به زاویه بین خط واصل گیرنده تا هدف و محور  $x$  ( $\phi_i$ ) می‌باشد، هر چند که در برخی موارد نظیر روش AOA، وابستگی ماتریس اطلاعات هم به زاویه مذکور ( $\phi_i$ ) و هم به فاصله بین هر یک از گیرنده‌ها تا هدف ( $r_i$ ) مربوط است.

با توجه به مواجهه با یک مسئله تخمین در حالت برداری، به‌جای کار بر روی CRLB به‌عنوان معیار خطا به‌صورت معادل از

### ۴-۴- شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی در برابر سامانه

#### مکان‌یابی مبتنی بر AOA

در این بخش نتایج حاصل شده در قالب یک سناریو ارائه می‌گردد.

#### □ سناریو ۱۰

هدف از تعریف این سناریو بررسی نقش موقعیت مکانی گیرنده‌ها نسبت به هدف، در گزینش آن‌ها به‌عنوان گیرنده قربانی در الگوریتم پیشنهادی تخصیص منابع اختلال در برابر یک سامانه مکان‌یابی مبتنی بر زاویه ورود سیگنال (AOA) می‌باشد.

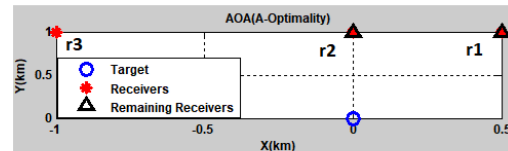
فرضیات سناریو حاضر به‌صورت زیر است:

الف- یک هدف که در مبدأ مختصات واقع است.

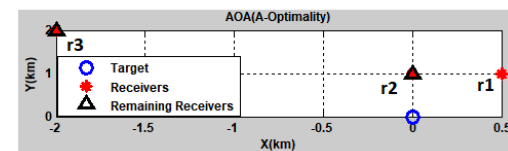
ب- سه گیرنده که یک بار مطابق چینش (الف) شکل (۲۴) و بار دیگر مطابق چینش (ب) در شکل مذکور واقع شده‌اند.

ج- سامانه جنگ الکترونیک توانایی ایجاد اختلال در یک گیرنده را داراست.

د- از معیار بهینگی A استفاده شده است.



(الف)



(ب)

شکل (۲۴): نتیجه شبیه‌سازی سناریو ۱۰ (الف) چینش اول و (ب) چینش دوم

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود تفاوت چینش (الف) با چینش (ب) در شکل (۲۴)، تنها در تغییر مکان گیرنده شماره ۳ می‌باشد. ملاحظه می‌گردد که در چینش (الف) Error! Reference source not found. گیرنده‌های شماره ۱ و ۲ در همسایگی یکدیگر، ولی گیرنده شماره ۳ به دور از آن دو در زاویه  $135^\circ$  نسبت به سمت مثبت محور افقی (با مرکزیت هدف) واقع شده است. بنابراین، نقش گیرنده شماره ۳ در افزایش دقت تخمین بیش از هر یک از دو گیرنده شماره ۱ و ۲ می‌باشد. گیرنده مذکور باید به‌عنوان گیرنده قربانی انتخاب گردد که همین نتیجه حاصل شده است. اما در چینش (ب) شکل مذکور با وجود این‌که اولاً دو گیرنده



د) با بسط معیارهای بهینگی مذکور در مورد هر یک از سامانه‌های مکان‌یابی، تحلیلی مشابه آنچه که در بخش ۲ برای سامانه مکان‌یابی مبتنی بر فاصله ارائه گردید، مورد دقت نظر قرار گیرد.

ذ) نتایج با فرض توانایی هر اخلاگر در ایجاد اختلال در بیش از یک گیرنده مورد بررسی قرار گیرد.

ر) به منظور دست‌یابی به الگوریتمی عملیاتی، ملاحظات مربوط به اخلاگر نظیر توان اخلاگر و محدوده پوششی و اثرگذاری اخلاگر در الگوریتم لحاظ شود.

ز) وزن دهی به اخلاگرها از حیث کارایی و دخالت اوزان در الگوریتم انجام شود.

س) با در نظر گرفتن ظرفیت اختلال بیش از یک مورد، فرآیند انتخاب اخلاگرها نه به صورت سری و به ترتیب اولویت، بلکه به صورت موازی و با حذف گروهی گیرنده‌ها به تعداد ظرفیت اختلال به صورت جایگشتی و سپس بررسی مقدار خطا به ازای هر دسته انجام شده و نتایج با حالت سری بحث شده در پایان‌نامه حاضر مقایسه گردد.

ش) قابلیت تعمیم الگوریتم پیشنهادی تخصیص منابع اختلال در مورد سامانه‌های مکان‌یابی مبتنی بر رادارهای MIMO مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد.

ص) قابلیت تعمیم الگوریتم پیشنهادی تخصیص منابع اختلال در مورد سامانه‌های مکان‌یابی مبتنی بر شبکه‌های حسگر بی‌سیم صورت پذیرد.

## ۶- منابع

- [1] 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, pp. 185-192, 2017.
- [2] S. M. R. Mosavi and H. Alimohammady, "Suboptimal Algorithms for Radar Jamming Resource Assignment," Advanced Defence Sci. & Tech., vol. 1, no. 3, pp. 33-41, 2015. (in Persian)
- [3] Y. Gao and D.-S. Li, "Electronic Counter measures Jamming Resource Optimal Distribution," Information Technology and Intelligent Transportation Systems, Advances in Intelligent Systems and Computing 455 (Springer), vol. 455, pp. 113-121, 2017.
- [4] V. Tas, "Optimal Use of TDOA Geo-Location Techniques Within the Mountainous Terrain of Turkey," M.S. Thesis, Naval Postgraduate School, Sept. 2012.
- [5] G. Hoye, "Analyses of the Geolocation Accuracy that Can Be Obtained Shipborn Sensors by Use of Time Difference of Arrival (TDOA), Scanphase, and Angle of Arrival (AOA) Measurements," rapport, Forsvarets forskningsinstitutt/Norwegian Defence Research Establishment (FFI), 2010.
- [6] D. Moreno-Salinas, A. M. Pascoal, and J. Aranda, "Optimal Sensor Placement for Multiple Target Positioning with Range-Only Measurements in Two-Dimensional Scenarios," Sensors (Basel), vol. 13, pp. 10674-10710, Aug. 2013.

معیارهای بهینگی مبتنی بر فشرده‌سازی ماتریس اطلاعات استفاده گردید. پس از انجام شبیه‌سازی با معیارهای بهینگی A، D و E ملاحظه شد که معیارهای مذکور به دلیل ماهیت به نسبت مشابه که همگی توابعی از مقادیر ویژه ماتریس اطلاعات هستند، گیرنده‌های نسبتاً مشابهی را به‌عنوان گیرنده قربانی انتخاب می‌نمایند.

به دلیل ماهیت خطی مسئله، چنانچه تعداد اهداف بیش از یک مورد باشد، خطای تخمین مکان‌یابی هر یک از اهداف با یکدیگر جمع و نتیجه حاصل به عنوان تابع خطا در الگوریتم پیشنهادی به کار گرفته می‌شود. همچنین در صورتی که ظرفیت اختلال بیش از یک مورد باشد، در الگوریتم پیشنهادی تخصیص منابع اختلال راداری در برابر سامانه‌های مکان‌یابی، گیرنده‌های قربانی به ترتیب اولویت و متناسب با حداکثر ظرفیت اختلال انتخاب خواهند شد. به‌عنوان ایده‌ها و کارهای آینده می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

الف) در مسئله تخصیص منابع اختلال در برابر سامانه‌های مکان‌یابی می‌توان از معیار دیگری به جز CRLB استفاده نمود. پیشنهاد می‌شود در زمینه استفاده از معیار CEP به‌عنوان معیار ارزیابی، تحقیقات لازم انجام شود.

ب) تخصیص منابع با فرض همدوسی اخلاگرها موضوع چالش برانگیزی است که همواره می‌توان دامنه مبحث تخصیص منابع اختلال راداری را با فرض همدوسی اخلاگرها وسعت بخشید.

ت) با توجه به نیاز الگوریتم مذکور به اطلاع از موقعیت گیرنده‌های مکان‌یاب دشمن، می‌توان با در نظر گرفتن یک بازه مکانی محتمل با یک تابع توزیع مشخص، چالش مذکور را پشت سر گذاشته و تحلیل و شبیه‌سازی‌ها را بر اساس آن انجام داد.

ث) نویز اندازه‌گیری به جز مدل گاوسی، با دیگر انواع توزیع به خصوص توزیع یکنواخت که با واقعیت عملی انطباق بیشتری دارد، در نظر گرفته شده و تحلیل و شبیه‌سازی بر اساس آن صورت پذیرد.

ج) در خصوص امکان پیاده‌سازی عملی الگوریتم پیشنهادی به خصوص از منظر توان مورد نیاز برای ایجاد اختلال مؤثر، تأمل و راه‌کارهای عملی ارائه گردد.

ح) با فرض متحرک بودن گیرنده‌ها و اهداف و همچنین اخلاگرها، مسئله تخصیص منابع اختلال در برابر سامانه‌های مکان‌یابی مورد مطالعه قرار گرفته و راهبرد تصمیم‌سازی در این حالت به دست آید.

خ) با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، سایر سامانه‌های مکان‌یابی نظیر سامانه مکان‌یابی مبتنی بر اختلاف فرکانس ورود سیگنال مورد بررسی قرار گیرد.

- [16] A. M. Haimovich, R. S. Blum, and L. J. Cimini, "MIMO Radar with Widely Separated Antennas," IEEE Signal Processing Magazine, vol. 25, pp. 116-129, 2008.
- [17] E. Fishler, A. Haimovich, R. Blum, D. Chizhik, L. Cimini, and R. Valenzuela, "MIMO radar: An Idea Whose Time Has Come," in Proceedings of the 2004 IEEE Radar Conference (IEEE Cat. No.04CH37509), pp. 71-78, 2004.
- [18] [18] E. Fishler, A. Haimovich, R. S. Blum, L. J. Cimini, D. Chizhik, and, R. A. Valenzuela, "Spatial Diversity in Radars-Models and Detection Performance," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 54, pp. 823-838, 2006.
- [19] H. Godrich, A. M. Haimovich, and R. S. Blum, "Target Localization Accuracy Gain in MIMO Radar-Based Systems," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 56, pp. 2783-2803, 2010.
- [20] B. O'Keefe, "Finding Location with Time of Arrival and Time Difference of Arrival Techniques," in ECE Senior Capstone Project (ECE '17), 2017.
- [21] [21] W. Meng, L. Xie, and W. Xiao, "Optimal TDOA Sensor-Pair Placement With Uncertainty in Source Location," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 65, pp. 9260-9271, 2016.
- [22] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, and J. Liu, "Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems," IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), vol. 37, pp. 1067-1080, 2007.
- [23] B. Omidali and S. S. A.-A. B. Shirazi, "Sensor Placement to Improve the Positioning Performance Based on Angle of Arrival (AOA)," Wireless Engineering and Technology, vol. 01, pp. 41-45, 2010.
- [24] K. Doğançay and H. Hmam, "Optimal Angular Sensor Separation for AOA Localization," Signal Processing, vol. 88, pp. 1248-1260, 2008.
- [7] Wikipedia, "Optimal design," [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Optimal\\_design&oldid=841573741](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Optimal_design&oldid=841573741), 2018.
- [8] S. Herath and P. Pathirana, "Optimal Sensor Arrangements in Angle of Arrival (AoA) and Range Based Localization with Linear Sensor Arrays," Sensors (Basel), vol. 13, pp. 12277-12294, 2013.
- [9] N. H. Nguyen and K. Dogancay, "Optimal Geometry Analysis for Multistatic TOA Localization," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 64, pp. 4180-4193, 2016.
- [10] A. Farina and E. Hanle, "Position Accuracy in Netted Monostatic and Bistatic Radar," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. AES-19, pp. 513-520, 1983.
- [11] A. Beck, P. Stoica, and J. Li, "Exact and Approximate Solutions of Source Localization Problems," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 56, pp. 1770-1778, 2008.
- [12] S. Chen and K. C. Ho, "Achieving Asymptotic Efficient Performance for Squared Range and Squared Range Difference Localizations," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 61, pp. 2836-2849, 2013.
- [13] J. Shen, A. F. Molisch, and J. Salmi, "Accurate Passive Location Estimation Using TOA Measurements," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 11, pp. 2182-2192, 2012.
- [14] L. Rui, and K. C. Ho, "Elliptic Localization: Performance Study and Optimum Receiver Placement," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 62, pp. 4673-4688, 2014.
- [15] S. Coraluppi, "Multistatic Sonar Localization," IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 31, pp. 964-974, 2006.

---

## A Novel Algorithm for Radar Jamming Resource Allocation

H. Alimohammady, V. Tabatabavakily\*

\*Iran University of Science and Technology

(Received: 02/05/2018, Accepted: 05/03/2019)

### ABSTRACT

*Optimal allocation of jamming resources is one of the requirements in the electronic warfare. Following the design and production of a variety of jammers, this question remains that with jamming resource limitations in an electronic battle scene involving a large number of enemy radars, how should these limited resources be allocated and which radars should be assigned to a jammer. In this regard, the present article addresses allocating jamming resources to the enemy's positioning system (consisting of a number of sensors for parameter estimation and the system for integrating the estimated data) and proposes a new algorithm. Maximization of estimation error is the criterion for jamming resource allocation. In the proposed algorithm, receivers whose disruptions severely affect the accuracy of the estimation are chosen as targets. The Cramer-Rao Lower Bound (CRLB) is used as an error measurement in the jamming resource allocation algorithm. When the receivers to be jammed are determined, the uncertainty of the allocation is removed.*

**Keywords:** Resource Allocation, Localization Systems, Jamming, CRLB

---

\* Corresponding Author Email: vakily@iust.ac.ir