

## تأثیر انواع اندازه‌گیری‌ها و چینش حسگرها در مکان‌یابی هدف با پردازش سیگنال‌های مراقبت در رادار غیرفعال چند فرستنده و چند گیرنده

سعید فولادی تالاری<sup>۱</sup>، کمال محامدپور<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، ۲- استاد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی تهران، ایران

(دریافت: ۹۸/۰۷/۰۹؛ پذیرش: ۹۹/۰۳/۱۷)

### چکیده

مکان‌یابی اهداف به‌وسیله رادار غیرفعال یکی از زمینه‌های پرکاربرد در تحقیقات نظامی و تجاری است. در این مقاله سناریو پردازش سیگنال‌های مراقبت تنها در رادار غیرفعال چند فرستنده و چند گیرنده را بررسی می‌کنیم. این سناریوها شامل پردازش متمرکز سیگنال‌های بازتاب دریافتی در حسگر مرکزی و پردازش غیرمتمرکز سیگنال‌های بازتاب در حسگرهای گیرنده است. انواع اندازه‌گیری‌های ممکن شامل  $\text{Time Difference of Arrival (TDOA)}$ ،  $\text{Gain Ratio of Arrival (GROA)}$ ،  $\text{Angle of Arrival (AOA)}$  و ترکیب‌هایشان تحت سناریوهای مختلف ارائه شده است. باند پایین Cramer Rao برای خطای تخمین مکان هدف با این اندازه‌گیری‌ها برای سناریوهای پردازش متمرکز سیگنال‌های مراقبت به‌منظور محاسبه اندازه‌گیری‌های TDOA و GROA و پردازش غیرمتمرکز سیگنال‌های مراقبت به‌منظور محاسبه اندازه‌گیری‌های AOA را ارائه شده است. تأثیر سناریوهای متفاوت پردازش سیگنال و انواع اندازه‌گیری‌ها بر کارایی تخمین مکان هدف به‌وسیله CRLB بررسی شده است. همان‌طور که در نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده است، استفاده توأم از اندازه‌گیری‌ها همواره کارایی بهتر از استفاده تنه‌ای آنها دارد و قرار دادن حسگرهای گیرنده در فواصل دور کارایی را بسیار زیاد بهبود می‌بخشد.

### واژگان کلیدی

رادار غیرفعال، رادار چند فرستنده چند گیرنده، مکان‌یابی هدف، پردازش سیگنال‌های بازتاب، باند پایین Cramer Rao.

### ۱. مقدمه

ماهواره‌ای [۱۴] مانند GNSS [۱۵]، نیز برای این کاربرد مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۱۶-۱۷].

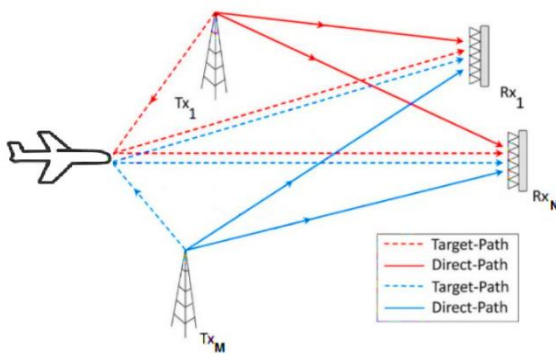
مکان‌یابی هدف تحت سناریوهای متفاوتی مثل رادارهای فعال بررسی شده است [۱۸-۱۹]. پردازش‌های رادار غیرفعال معمولاً بر مبنای رادارهای دوایستا و چندایستا انجام می‌شود که برخی مشابهت‌ها با رادار فعال دارد. در حالت پردازش دوایستا نیاز به دریافت سیگنال مسیر مستقیم و بازتاب هدف به‌صورت توأم است. با تعمیم آن به حالت چندایستا مکان‌یابی و رهگیری هدف ممکن می‌شود [۲۰-۲۴]. علاوه بر پردازش سیگنال‌های مرجع مراقبت امکان پردازش سیگنال‌های مراقبت تنها در صورت عدم دریافت سیگنال مسیر مستقیم در حسگر گیرنده نیز وجود دارد. برخی از سناریوهای پردازشی و نحوه آشکارسازی در [۲۵-۲۶] بررسی شده است.

مکان‌یابی با سیگنال‌های دریافتی از خود هدف در زمینه

رادار غیرفعال به مکان‌یابی اهداف به‌وسیله دریافت بازتاب تشعشع‌های فرستنده‌های موجود در محیط از هدف می‌پردازد. این دسته از رادارها سالیان متمادی است که به‌دلیل خاصیت پنهانی به‌واسطه عدم تشعشع سیگنال در زمینه‌های نظامی بسیار مورد توجه بوده است. از سوی دیگر هزینه پایین این رادارها به‌دلیل عدم نیاز به فرستنده و همچنین عدم نیاز به تخصیص فرکانس در زمینه تجاری مورد توجه واقع شده است [۱۰-۱۱].

انواع مختلفی از فرستنده‌های فرصت‌طلب موجود در محیط برای رادار غیرفعال مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرستنده‌های پخش زمینی مانند رادیو FM، رادیو دیجیتال DAB، تلویزیون دیجیتال DVB-T و DVB-T2 [۱۱]، انواع شبکه‌های مخابرات سلولی مانند GSM، 3G و 4G [۱۲]. همچنین سیگنال‌های WiFi [۱۳]. علاوه بر فرستنده‌های زمینی فرستنده‌های

همان طور که نشان داده شده است،  $M$  فرستنده فرصت طلب در محیط سیگنال تشعشع می کنند. سیگنال بازتابی از هدف توسط  $N$  حسگر گیرنده دریافت می شود. گیرنده‌ها از آرایه‌ای از آنتن‌های همه جهتی برای دریافت سیگنال بازتاب و آنتن جهتی برای دریافت سیگنال مسیر مستقیم استفاده می کنند.



شکل (۱): شمای جغرافیای مسئله رادار غیرفعال.

## ۲-۱. مدل سناریو دوایستا

مدل سامانه رادار غیرفعال چند فرستنده و چند گیرنده مانند رادار MIMO با آنتن‌های گسترده در نظر گرفته می شود. در سناریوی رادار غیرفعال فرستنده‌ها در اختیار طراح رادار نیست و معمولاً فرستنده‌ها با فاصله زیاد از هم جهت پوشش منطقه تحت سرویس قرار دارند. البته آنتن‌های گیرنده می توانند به صورت متمرکز در یک نقطه قرار داشته باشند. در مسئله رادار غیرفعال چند سناریو ممکن است برای هر زوج دوایستا فرستنده-هدف-گیرنده و فرستنده-گیرنده رخ بدهد. این سناریوها با فرض دریافت و یا عدم دریافت هر یک از سیگنال‌های مسیر مستقیم و/یا مسیر بازتاب به وجود می آید و عبارت‌اند از:

- هم سیگنال مسیر مستقیم و هم سیگنال بازتاب دوایستا در گیرنده دریافت شوند. یعنی هم سیگنال مرجع و هم سیگنال مراقبت در گیرنده موجود است.
- تنها سیگنال بازتاب دریافت شود. یعنی تنها سیگنال مراقبت در گیرنده موجود است.

حالت‌های فوق برای هر زوج دو-ایستا در هر گیرنده متفاوت است که به سناریوی عملکرد، چینش حسگرهای گیرنده و فرستنده، مکان هدف و جغرافیای منطقه وابسته است. ما سناریوهای دریافت سیگنال مراقبت را بدون در نظر گرفتن سیگنال مرجع فرستنده بررسی می کنیم که شامل هر دو سناریوی فوق می شود.

## ۲-۲. مدل سیگنال

مکان فرستنده‌ها را با  $\underline{p}_{Tx_i} = [x_{Tx_i} \ y_{Tx_i} \ z_{Tx_i}]^T$  و مکان

<sup>۱</sup> PSL بررسی می شود [۲۷-۲۸]. تأثیر توپولوژی جغرافیایی در مسئله PSL بررسی شده است [۲۹]. این مسئله مشابه پردازش کانال مراقبت در رادار غیرفعال است.

در این مقاله سناریوهای مختلف اندازه‌گیری در رادارهای غیرفعال و تأثیر آن بر کارایی مکان‌یابی را بررسی می کنیم. این اندازه‌گیری‌ها می تواند اندازه‌گیری‌های AOA، GROA، TDOA یا تلفیقی از آنها باشد. با توجه به نحوه چینش حسگرهای گیرنده و امکان دریافت یا عدم دریافت سیگنال مسیر مستقیم فرستنده سناریوهای متفاوتی به وجود می آید. در این مقاله پردازش سیگنال‌های مراقبت مستقل از سیگنال‌های مرجع فرستنده را بررسی کرده ایم. این سناریوها شامل پردازش متمرکز سیگنال‌های مراقبت در حسگر مرکزی برای محاسبه اندازه‌گیری‌های TDOA و GROA بین حسگرهای گیرنده پردازش غیرمتمرکز سیگنال‌های مراقبت در حسگرهای گیرنده برای محاسبه اندازه‌گیری‌های AOA است. علاوه بر چینش حسگرهای گیرنده و سناریوی پردازش سیگنال برای به دست آوردن اندازه‌گیری‌ها، نوع شبکه فرستنده‌های فرصت طلب نیز بر مسئله مکان‌یابی در رادار غیرفعال تأثیرگذار است. این شبکه‌ها معمولاً به دو دسته تقسیم می شوند. دسته اول شبکه‌هایی هستند که سیگنال فرستنده‌های فرصت طلب در آنها قابل جداسازی است مانند شبکه‌هایی که در فرکانس‌های مجزا کار می کنند ( $MFN^2$ ). دسته دیگر شبکه‌هایی هستند که سیگنال فرستنده‌های فرصت طلب در آنها قابل جداسازی نیست مانند شبکه‌هایی که در یک فرکانس فعالیت می کنند ( $SFN^3$ ). در این مقاله هر دو دسته مورد بررسی قرار گرفته است.

بررسی‌ها با ارائه CRLB مکان‌یابی مستقل از نوع سیگنال تحت سناریوهای مختلف و توسعه حالت‌های ارائه شده در [۲۵] و [۲۶] با استفاده از رویه [۲۹] بررسی شده است. مزایا و معایب انواع سناریوها توسط نتایج شبیه‌سازی ارائه شده است. ساختار این مقاله به شکلی است که در بخش ۲ مدل سیگنال و اندازه‌گیری‌ها ارائه شده است. سناریوهای متفاوت و الزامات آنها به همراه CRLB هر سناریو در بخش ۳ و شبیه‌سازی‌ها در بخش ۴ ارائه شده‌اند. نتیجه‌گیری در بخش ۵ ارائه شده است.

## ۲. مدل سامانه

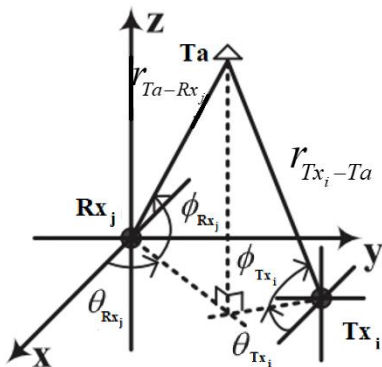
در رادار غیرفعال از فرستنده‌های فرصت طلب در محیط استفاده می شود. سیگنال بازتابی هدف توسط حسگرهای گیرنده دریافت می شود. شمای جغرافیایی مسئله در شکل (۱) نشان داده است.

<sup>۱</sup> Passive Source Localization

<sup>۲</sup> Multi-Frequency Network

<sup>۳</sup> Single-Frequency Network

می‌دهیم. همچنین با فرض آنتن همه‌جهتی برای فرستنده در ارسال سیگنال مقدار  $A_{Tx_i-Ta}$  غیر وابسته به مکان هدف و برابر مقدار ثابت  $A_{Tx_i}$  خواهد بود. همچنین در صورت استفاده آنتن همه‌جهتی در گیرنده برای دریافت سیگنال مسیر بازتاب  $A_{Ta-Rx_j}$  غیر وابسته به مکان هدف برابر مقدار ثابت  $A_{Rx_j}$  خواهد بود.



شکل (۲): شمای پارامترهای معادله دو ایستا.

### ۳-۲. مدل اندازه‌گیری‌ها

سیگنال‌های دریافتی در حسگرهای گیرنده ابتدا به پردازش‌های آشکارسازی داده می‌شوند. این پردازش‌ها شامل دریافت/عدم دریافت سیگنال مسیر مستقیم، حذف سیگنال مسیر مستقیم (در صورت وجود) از کانال مراقبت، آشکارسازی سیگنال مراقبت، محاسبه زمان و/یا توان و/یا جهت و/یا فرکانس داپلر سیگنال بازتاب دریافتی از هدف است.

با توجه به سناریوهای دریافت و عدم دریافت سیگنال‌های مرجع و مراقبت، ما سناریوی دریافت سیگنال مراقبت مستقل از حضور یا عدم حضور سیگنال مسیر مستقیم را برای پردازش‌های بعدی رادار غیرفعال شامل مکان‌یابی و رهگیری هدف مورد استفاده قرار می‌دهیم. در این سناریو امکان استفاده از ۳ دسته اندازه‌گیری در حسگرهای گیرنده وجود دارد. فرض می‌شود یک لینک بین حسگرهای گیرنده و حسگر مرکزی وجود دارد و سیگنال‌های نمونه‌برداری شده برای محاسبه اندازه‌گیری‌های لازم برای مکان‌یابی هدف به حسگر مرکزی ارسال می‌شوند. با فرض محاسبه تمام اندازه‌گیری‌های ممکن که همان TDOA و GROA و AOA است بردار اندازه‌گیری‌ها برابر است با

$$k = \begin{bmatrix} \tau \\ g \\ \theta \\ \phi \end{bmatrix} \quad (۶)$$

حسگرهای گیرنده را با  $\underline{p}_{Rx_j} = [x_{Rx_j} \ y_{Rx_j} \ z_{Rx_j}]^T$  نشان می‌دهیم. که  $i$  اندیس شماره فرستنده و  $j$  اندیس شماره گیرنده است. هدف در مکان  $\underline{p}_{Ta} = [x_{Ta} \ y_{Ta} \ z_{Ta}]^T$  قرار دارد. سیگنال بازتاب دریافتی از هدف توسط حسگر زام در معادله (۱) نشان داده شده است.

$$SS_{Tx_i-Ta-Rx_j}(t) = \frac{s_{Tx_i}(t - \tau_{Tx_i-Ta-Rx_j})}{g_{Tx_i-Ta-Rx_j}} \quad (۱)$$

در این معادلات  $SS_{Tx_i-Ta-Rx_j}(t)$  سیگنال بازتاب دریافتی از هدف،  $s_{Tx_i}(t)$  سیگنال ارسالی مسیر مستقیم از فرستنده نام،  $\tau_{Tx_i-Ta-Rx_j}$  نشان دهنده تأخیر مسیر فرستنده-هدف-گیرنده،  $g_{Tx_i-Ta-Rx_j}$  نشان دهنده تضعیف مسیر و  $\theta_{Ta-Rx_j}, \phi_{Ta-Rx_j}$  جهت سیگنال دریافتی در گیرنده زام از هدف است. مقادیر این پارامترها بسته به مشخصات فرستنده، هدف و گیرنده در معادله‌های (۲) الی (۵) ارائه شده است.

$$\tau_{Tx_i-Ta-Rx_j} = \frac{r_{Tx_i-Ta} + r_{Ta-Rx_j}}{c} \quad (۲)$$

$$g_{Tx_i-Ta-Rx_j} = \frac{(r_{Tx_i-Ta} r_{Ta-Rx_j})^\gamma}{A_{Tx_i-Ta} \sqrt{\sigma_{Tx_i-Ta-Rx_j}} A_{Rx_j-Ta}} \quad (۳)$$

$$\theta_{Ta-Rx_j} = \arctan\left(\frac{y_{Ta} - y_{Rx_j}}{x_{Ta} - x_{Rx_j}}\right) \quad (۴)$$

$$\phi_{Ta-Rx_j} = \arcsin\left(\frac{z_{Ta} - z_{Rx_j}}{r_{Ta-Rx_j}}\right) \quad (۵)$$

زویا و فواصل فوق در شکل (۲) نشان داده شده است. در این معادلات  $A_{Rx_j-Ta}$  و  $A_{Tx_i-Ta}$  به ترتیب آنتن فرستنده و گیرنده در راستای هدف است،  $\sigma_{Tx_i-Ta-Rx_j}$  مقدار RCS هدف در راستای زاویه دوایستا فرستنده نام-هدف-گیرنده زام و  $r_{x-y} = \|\underline{p}_x - \underline{p}_y\|$  فاصله بین مکان  $\underline{p}_x$  و  $\underline{p}_y$  است،  $c$  سرعت انتشار سیگنال و مؤلفه  $\gamma$  افت مسیر است که برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود.  $\|\underline{x}\|$  نشان دهنده نرم بردار  $\underline{x}$  است.

باید توجه شود که با فرض اهداف نقطه‌ای که برای اهداف دور صادق است مقدار  $\sigma_{Tx_i-Ta-Rx_j}$  برای تمامی زوج دوایستا فرستنده-هدف-گیرنده‌ها برابر خواهد بود که آن را با  $\sigma$  نشان

سیگنال‌های دریافتی می‌تواند به صورت متمرکز در حسگر مرکزی یا به صورت غیرمتمرکز در خود گیرنده‌ها انجام شود. در پردازش متمرکز، سیگنال‌ها به حسگر مرکزی ارسال می‌شود و بخشی از پردازش‌های سیگنال در حسگر مرکزی انجام می‌شود. در پردازش غیرمتمرکز، پردازش سیگنال تنها در حسگرهای گیرنده انجام می‌شود و داده‌های حاصل به حسگر مرکزی ارسال می‌شود. در پردازش مکان‌یابی رادار غیرفعال یک مرحله اساسی تخصیص داده است. تخصیص داده شامل مشخص کردن فرستنده فرصت‌طلب تشعشع کننده سیگنال بازتاب دریافتی از یک سو و مشخص کردن اندازه‌گیری‌های انجام شده مرتبط به یک هدف در حسگرهای گیرنده مختلف از سویی دیگر است. این تخصیص داده‌ها به نوع توپولوژی شبکه نیز وابسته است. یعنی بعد از محاسبه اندازه‌گیری‌ها باید مشخص شود کدام اندازه‌گیری‌ها به یک هدف مشخص تعلق دارد و منشأ تشعشع سیگنال، کدام فرستنده بوده است. در برخی روش‌ها این کار با در نظر گرفتن تمامی حالت‌های ممکن توسط الگوریتم‌های رهگیری MHT<sup>۱</sup> صورت می‌گیرد [۳۰-۳۲].

علاوه بر نوع پردازش سیگنال، توپولوژی شبکه فرستنده‌های فرصت‌طلب بکار رفته نیز در محاسبه بردارهای اندازه‌گیری تأثیرگذار است. این شبکه‌ها می‌تواند به دو صورت MFN و SFN باشند. در شبکه‌های MFN سیگنال‌های فرستنده‌های فرصت‌طلب در حسگرهای گیرنده قابل جداسازی هستند مانند شبکه‌ای از فرستنده‌ها با فرکانس‌های متفاوت. از این‌رو هر گیرنده یک بازتاب از هدف به ازای هر فرستنده دریافت می‌کند. در شبکه‌های SFN سیگنال‌های فرستنده در حسگرهای گیرنده قابل جداسازی نیست. مانند فرستنده‌هایی هم فرکانس. بنابراین حسگرهای گیرنده تنها یک بازتاب از هدف که ناشی از سیگنال فرستنده غالب است دریافت می‌کنند. مسئله تخصیص داده در هر دو نوع شبکه شامل مشخص کردن اندازه‌گیری‌های مرتبط با یک هدف است. در شبکه‌های SFN علاوه بر این، باید فرستنده سیگنال بازتاب دریافتی نیز مشخص شود. در ادامه بردارهای اندازه‌گیری‌ها ارائه شده است.

### ۳-۱. بردارهای اندازه‌گیری

در این بخش بردارهای اندازه‌گیری تحت سناریوهای مورد بررسی ارائه شده است. برای پردازش سیگنال‌های مراقبت دو سناریوی پردازش متمرکز سیگنال‌های مراقبت در حسگر مرکزی برای به دست آوردن بردار اطلاعات TDOA و GROA و پردازش غیرمتمرکز سیگنال‌های مراقبت در حسگرهای گیرنده برای به دست آوردن بردار اندازه‌گیری‌های DOA را در نظر می‌گیریم. در ادامه این بردارهای اندازه‌گیری را ارائه می‌دهیم.

در معادله فوق بردارهای  $\underline{k}$ ،  $\underline{\tau}$ ،  $\underline{g}$ ،  $\underline{\theta}$  و  $\underline{\phi}$  به ترتیب بردارهای تمامی اندازه‌گیری‌ها، اندازه‌گیری‌های TDOA، اندازه‌گیری‌های GROA، اندازه‌گیری‌های DOA زاویه سمت و اندازه‌گیری‌های DOA زاویه ارتفاع است. این بردار برای حالت‌هایی که از یک دسته از اندازه‌گیری‌ها استفاده نمی‌شود به راحتی قابل تقلیل است. محاسبه این اندازه‌گیری‌ها با نویز همراه است که آن را به صورت جمع شونده مدل می‌کنیم. برای سادگی محاسبات آتی نویز اندازه‌گیری‌ها را گوسی جمع شونده با میانگین صفر در نظر می‌گیریم. بنابراین بردار اندازه‌گیری شده برابر است با

$$\underline{\bar{k}} = \underline{k} + \underline{n}_k \quad (7)$$

$$\underline{n}_k \sim N(0, Q) \quad (8)$$

$$\text{diag}(Q) = [\underline{\sigma}_\tau^2 \quad \underline{\sigma}_g^2 \quad \underline{\sigma}_\theta^2 \quad \underline{\sigma}_\phi^2]$$

در معادله فوق بردار  $\underline{\bar{k}}$  نشان دهنده مقادیر اندازه‌گیری شده است.  $\underline{\sigma}_\tau^2$ ،  $\underline{\sigma}_g^2$ ،  $\underline{\sigma}_\theta^2$  و  $\underline{\sigma}_\phi^2$  به ترتیب بردارهای واریانس‌های نویز اندازه‌گیری‌های TDOA، GROA، DOA زاویه سمت و DOA زاویه ارتفاع است. حالت‌های دیگر اندازه‌گیری‌ها با ساده‌سازی و تقلیل این بردارها به دست می‌آید. حالت‌های ممکن دیگر شامل TDOA تنها، AOA تنها، TDOA، AOA و TDOA و GROA، AOA و GROA را می‌توان با حذف بردار اطلاعاتی که استفاده نمی‌شود به دست آورد.

### ۳. پردازش سیگنال مراقبت برای اندازه‌گیری‌های

#### مکان‌یابی

برای مکان‌یابی و رهگیری هدف در رادار غیرفعال باید بعد از آشکارسازی سیگنال مراقبت در حسگرهای گیرنده، اندازه‌گیری‌های اختلاف زمان و نسبت توان سیگنال‌های ورودی به حسگرهای گیرنده و جهت ورود سیگنال‌ها را محاسبه نمود. بردار اندازه‌گیری مورد استفاده برای مکان‌یابی در معادله (۶) نشان داده شده است. بنا به مسئله می‌توان همه یا تعدادی از این اندازه‌گیری‌ها را بکار برد. مکان‌یابی و رهگیری هدف در حسگر مرکزی متناسب با سناریوی پردازشی با استفاده از این اندازه‌گیری‌ها و دانستن مکان حسگرهای گیرنده و فرستنده‌های فرصت‌طلب انجام می‌شود. در این بخش با فرض پردازش سیگنال‌های مراقبت در گیرنده‌ها بردارهای اندازه‌گیری ممکن TDOA، GROA و AOA را ارائه می‌دهیم. همچنین باند پایین کرامر راتو (CRLB) به عنوان معیاری برای تحلیل کارایی مکان‌یابی ارائه می‌شود.

محاسبه اندازه‌گیری‌ها در رادار غیرفعال با پردازش

<sup>1</sup> Multiple Hypothesis Tracker

صورت فرض هدف نقطه‌ای  $\sigma_{T_{X_i}-T_{a-Rx_j}}$  ها با هم برابر هستند و معادله GROA به تنها نسبت بردها ساده می‌شود.

### ۳-۱-۲. بردارهای اطلاعات DOA

هر حسگر گیرنده می‌تواند جهت سیگنال بازتاب دریافتی را با پردازش سیگنال دریافتی از آرایه آنتن اندازه‌گیری نماید. در یک شبکه MFN تعداد  $M \times N$  اندازه‌گیری یعنی یک جهت به ازای سیگنال بازتاب دریافتی در هر حسگر گیرنده به ازای هر فرستنده داریم. بردارهای اندازه‌گیری در معادله زیر ارائه شده است.

$$\underline{\theta}_k = \begin{bmatrix} \theta_{Ta-Rx_1} |Tx_1 \\ \dots \\ \theta_{Ta-Rx_N} |Tx_1 \\ \theta_{Ta-Rx_1} |Tx_M \\ \dots \\ \theta_{Ta-Rx_N} |Tx_M \end{bmatrix}; \underline{\phi}_k = \begin{bmatrix} \phi_{Ta-Rx_1} |Tx_1 \\ \dots \\ \phi_{Ta-Rx_N} |Tx_1 \\ \phi_{Ta-Rx_1} |Tx_M \\ \dots \\ \phi_{Ta-Rx_N} |Tx_M \end{bmatrix} \quad (11)$$

در شبکه SFN تعداد  $N$  اندازه‌گیری یعنی یک جهت در هر گیرنده به ازای فرستنده غالب داریم. که در معادله (۱۰) اندیس‌های  $T_{X_i}$  تنها به  $T_{X_s}$  تبدیل می‌شوند که  $s$  نشان‌دهنده اندیس فرستنده غالب در آن گیرنده است. در این معادلات  $\theta_{Ta-Rx_j}$  و  $\phi_{Ta-Rx_j}$  برابر است با

$$\theta_{Ta-Rx_j} = \text{atan} \left( \frac{\left( \frac{p_{Ta} - p_{Rx_j}}{r_{Ta-Rx_j}} \right) \underline{y}^T}{\left( \frac{p_{Ta} - p_{Rx_j}}{r_{Ta-Rx_j}} \right) \underline{x}^T} \right) \quad (12)$$

$$\phi_{Ta-Rx_j} = \text{atan} \left( \frac{\left( \frac{p_{Ta} - p_{Rx_j}}{r_{Ta-Rx_j}} \right) \underline{z}^T}{r_{Ta-Rx_j}} \right)$$

در این معادلات بردارهای  $\underline{x}$ ،  $\underline{y}$  و  $\underline{z}$  برابرند با

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \underline{y} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}; \underline{z} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

### ۳-۲. باند پایین کرامر- راتو (CRLB)

در این بخش باندهای تخمین مکان CRLB برای مکان‌یابی هدف با استفاده از اندازه‌گیری‌های حسگرهای گیرنده یعنی TDOA، GROA و AOA ارائه می‌شود. با استفاده از فرض گوسی بودن

### ۳-۱-۱. بردارهای اطلاعات TDOA و GROA در پردازش متمرکز کانال مراقبت-مراقبت

در این سناریو باید تمامی سیگنال‌های دریافتی نمونه‌برداری شده در حسگرهای گیرنده به حسگر مرکزی ارسال شوند. TDOAها و GROAها در حسگر مرکزی با پردازش سیگنال‌های بازتاب دریافتی از کانال مراقبت در حسگر گیرنده‌های متفاوت نسبت به تمام سایر حسگرهای گیرنده محاسبه می‌شود. TDOA می‌تواند از  $AF^1$  کانال‌های مراقبت-مراقبت و GROA می‌تواند از نسبت تخمین توان‌های ورودی به دست بیاید. در یک شبکه MFN تعداد  $M \times N(N-1)/2$  اندازه‌گیری TDOA و GROA به ازای هر فرستنده و در مقایسه کانال مراقبت هر دو زوج گیرنده خواهیم داشت که بردارهای اندازه‌گیری‌های آنها برابر است با

$$\underline{\tau}_k = \begin{bmatrix} \tau_{Ta-Rx_2, Ta-Rx_1} |Tx_1 \\ \dots \\ \tau_{Ta-Rx_{N-1}, Ta-Rx_N} |Tx_1 \\ \tau_{Ta-Rx_2, Ta-Rx_1} |Tx_2 \\ \dots \\ \tau_{Ta-Rx_{N-1}, Ta-Rx_N} |Tx_M \end{bmatrix}; \underline{g}_k = \begin{bmatrix} g_{Ta-Rx_2, Ta-Rx_1} |Tx_1 \\ \dots \\ g_{Ta-Rx_{N-1}, Ta-Rx_N} |Tx_1 \\ g_{Ta-Rx_2, Ta-Rx_1} |Tx_2 \\ \dots \\ g_{Ta-Rx_{N-1}, Ta-Rx_N} |Tx_M \end{bmatrix} \quad (9)$$

در شبکه SFN تعداد  $N \times (N-1)/2$  اندازه‌گیری TDOA و GROA خواهیم داشت که در معادله (۸) اندیس‌های  $T_{X_i}$  به  $T_{X_s}$  تبدیل می‌شوند. در این معادلات  $\tau_{Ta-Rx_j, Ta-Rx_l} |Tx_s$  و  $g_{Ta-Rx_j, Ta-Rx_l} |Tx_s$  در (۹) برابر هستند با

$$\tau_{Ta-Rx_j, Ta-Rx_l} |Tx_s = \tau_{Ta-Rx_j} - \tau_{Ta-Rx_l} = \frac{r_{Ta-Rx_j} - r_{Ta-Rx_l}}{c} \quad (10)$$

$$g_{Ta-Rx_j, Ta-Rx_l} |Tx_s = \frac{g_{Ta-Rx_j} |Tx_s}{g_{Ta-Rx_l} |Tx_s} = \frac{|SS_{Ta-Rx_j} |Tx_s|}{|SS_{Ta-Rx_l} |Tx_s|}$$

$$= \frac{A_{Tx_s-Ta} \sqrt{\sigma_{Tx_s-Ta-Rx_j}} A_{Rx_j-Ta} (r_{Tx_s-Ta-Rx_j})^y}{A_{Tx_s-Ta} \sqrt{\sigma_{Tx_s-Ta-Rx_l}} A_{Rx_l-Ta} (r_{Tx_s-Ta-Rx_l})^y}$$

باید توجه کرد که در صورت استفاده از آنتن‌های مشابه همه جهتی در حسگرهای گیرنده  $A_{Rx_j-Ta}$  ها با هم برابر هستند و در

<sup>1</sup>Ambiguity Function

$$\frac{\partial \theta_{Ta_k - Rx_j}}{\partial \underline{p}_{Ta_k}^T} = \frac{1}{l_{Ta_k - Rx_j}^2} \times \left( ((\underline{p}_{Ta_k} - \underline{p}_{Rx_j})^T \underline{x}) \underline{y} - ((\underline{p}_{Ta_k} - \underline{p}_{Rx_j})^T \underline{y}) \underline{x} \right) \quad (17)$$

$$\frac{\partial \phi_{Ta_k - Rx_j}}{\partial \underline{p}_{Ta_k}^T} = \frac{1}{r_{Ta_k - Rx_j}^2 l_{Ta_k - Rx_j}^2} \times \left( r_{Ta_k - Rx_j}^2 \underline{z} - ((\underline{p}_{Ta_k} - \underline{p}_{Rx_j})^T \underline{z})(\underline{p}_{Ta_k} - \underline{p}_{Rx_j}) \right)$$

در معادله فوق  $l_{Ta_k - Rx_j}$  برابر است با

$$l_{Ta_k - Rx_j} = \sqrt{(\underline{p}_{Ta_k} - \underline{p}_{Ta_k})^T [1 \ 1 \ 0]^T} \quad (18)$$

$$= \sqrt{(x_{Ta_k} - x_{Rx_j})^2 + (y_{Ta_k} - y_{Rx_j})^2}$$

#### ۴. نتایج شبیه‌سازی

در این بخش به ارائه نتایج شبیه‌سازی سناریوهای مختلف پردازشی خواهیم پرداخت. مقدار باند پایین خطای تخمین مکان هدف (Root Mean Square Error) RMSE با جذر CRLB ارائه خواهد شد. مقدار ارائه‌شده از جنس متغیر فاصله و به متر است.

شبیه‌سازی‌ها در دو دسته متفاوت ارائه خواهند شد. در دسته اول تأثیر مکان هدف، چینش حسگرها و انواع اندازه‌گیری‌ها بر CRLB بررسی خواهد شد. در این حالت نتایج شبیه‌سازی با دواپر رنگی کانتور که مشخص‌کننده میزان خطا در صفحه‌ای دوبعدی است نشان داده خواهد شد. این شبیه‌سازی‌ها دید کلی از تأثیر مکان هدف و مقایسه سناریوهای متفاوت را ارائه می‌دهد. در دسته دوم تأثیر خطای اندازه‌گیری‌ها بر سناریوهای پردازش مختلف بررسی خواهد شد. در این حالت مزایا و معایب سناریوها به‌ازای بازه‌ای از خطاهای اندازه‌گیری مشاهده خواهد شد.

مکان حسگرهای فرستنده و گیرنده را تحت دو دسته متفاوت فاصله کم بین حسگرهای گیرنده و فرستنده‌ها و فاصله دور حسگرهای گیرنده و فرستنده‌ها در نظر می‌گیریم. مکان فرستنده‌ها در جدول (۱) و گیرنده‌ها در چپینش فاصله نزدیک در جدول (۲) و برای حالت چپینش فاصله دور در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول (۱): موقعیت فرستنده‌ها			
z	y	x	موقعیت حسگر
۱۰۰m	۰ km	۰ km	۱
۱۰۰m	۲۰ km	۲۰ km	۲
۱۰۰m	۲۰ km	-۲۰ km	۳

خطای اندازه‌گیری‌ها، CRLB را با کمک محاسبه ماتریس فیشر اطلاعات متناسب با اندازه‌گیری‌های مورد استفاده و مستقل از نوع سیگنال‌ها به دست می‌آوریم. ماتریس CRLB برای  $\underline{p}_{Ta}$  عبارت است از [۳۳]:

$$CRLB(\underline{p}_{Ta}) = FIM^{-1}(\underline{p}_{Ta}) \quad (14)$$

ماتریس FIM نشان‌دهنده ماتریس فیشر اطلاعات است. با فرض ساده‌کننده گوسی بودن نویز بردار اندازه‌گیری‌ها  $\underline{k}$ ، ماتریس فیشر اطلاعات اندازه‌گیری برابر است با

$$FIM(\underline{p}_{Ta}) = \left( \frac{\partial \underline{k}}{\partial \underline{p}_{Ta}^T} \right)^T Q^{-1} \left( \frac{\partial \underline{k}}{\partial \underline{p}_{Ta}^T} \right) \quad (15)$$

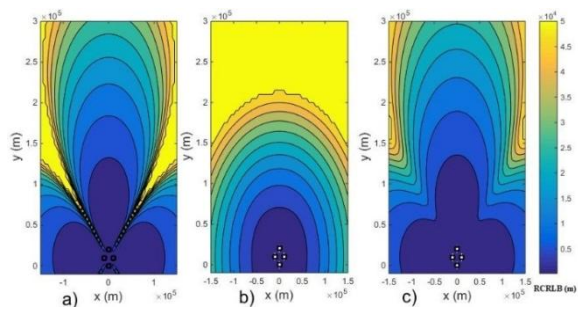
در معادله فوق بردار  $\underline{k}$  همان بردار اندازه‌گیری‌ها،  $Q$  ماتریس کواریانس اندازه‌گیری‌ها و  $\partial \underline{k} / \partial \underline{p}_{Ta}^T$  نشان‌دهنده مشتق بردار اندازه‌گیری نسبت به مکان هدف است.  $\partial \underline{k} / \partial \underline{p}_{Ta}^T$  برای اندازه‌گیری‌های TDOA، GROA و AOA تحت سناریوهای پردازش متمرکز و غیرمتمرکز باید محاسبه شود. این مقدار برای اندازه‌گیری‌های TDOA و GROA برای سناریوهای پردازش متمرکز کانال مراقبت - مراقبت ارائه‌شده در معادله (۹) با فرض ثابت بودن  $\sigma$  برابر است با

$$\frac{\partial \tau_{Ta_k - Rx_j, Ta_k - Rx_l}}{\partial \underline{p}_{Ta_k}^T} = \frac{1}{c} \left( \frac{[\underline{p}_{Ta_k} - \underline{p}_{Rx_j}]^T}{r_{Ta_k - Rx_j}} - \frac{[\underline{p}_{Ta_k} - \underline{p}_{Rx_l}]^T}{r_{Ta_k - Rx_l}} \right)$$

$$\frac{\partial g_{Ta_k - Rx_j, Ta_k - Rx_l}}{\partial \underline{p}_{Ta_k}^T} = \frac{A_{Tx_s - Ta_k} A_{Rx_j - Ta_k}}{A_{Tx_s - Ta_k} A_{Rx_j - Ta_k}} \sqrt{\frac{\sigma_{Tx_s - Ta_k - Rx_l}^2 r_{Ta_k - Rx_j}}{\sigma_{Tx_s - Ta_k - Rx_j}^2 r_{Ta_k - Rx_l}}} \times \left( \frac{[\underline{p}_{Ta_k} - \underline{p}_{Rx_j}]^T}{r_{Ta_k - Rx_j}^2} - \frac{[\underline{p}_{Ta_k} - \underline{p}_{Rx_l}]^T}{r_{Ta_k - Rx_l}^2} \right) \quad (16)$$

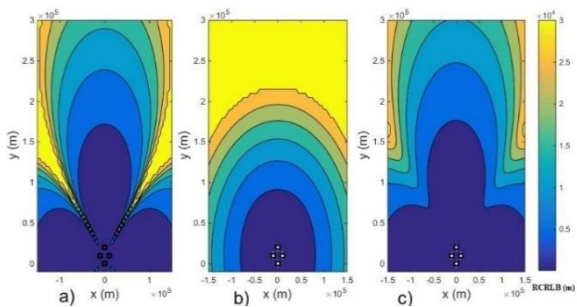
پارامتر  $\partial \underline{k} / \partial \underline{p}_{Ta}^T$  برای اندازه‌گیری‌های DOA زاویه سمت و زاویه ارتفاع برای پردازش غیرمتمرکز کانال مراقبت ارائه‌شده در معادله (۱۱) برابر است با:

مشهود است که مقدار FIM برای اندازه‌گیری‌های AOA با مجذور برد رابطه معکوس دارد و در نتیجه مقدار خطای CRLB با آن رابطه مستقیم دارد. در حالی که این رابطه برای اندازه‌گیری‌های TDOA وابسته به خود برد است نه مجذور آن. استفاده توأم از این اندازه‌گیری‌ها باعث بهبود مکان‌یابی در کل فضا و رفع نقاط کور TDOA و حساسیت به برد AOA می‌شود.



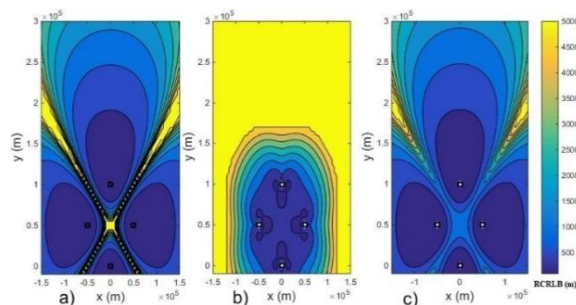
شکل (۳): مکان‌یابی در محدوده X و Y برای

اندازه‌گیری‌های TDOA و AOA زاویه سمت و ارتفاع با انحراف معیار خطای اندازه‌گیری به ترتیب برابر ۱۰۰ ns و ۱ deg و ۳ deg با یک فرستنده و ۴ گیرنده در فاصله نزدیک برای (a) TDOA تنها، (b) AOA تنها و (c) ترکیبی TDOA و AOA ترکیبی.



شکل (۴): مکان‌یابی در محدوده X و Y برای اندازه‌گیری‌های

TDOA و AOA زاویه سمت و ارتفاع با انحراف معیار خطای اندازه‌گیری به ترتیب برابر ۱۰۰ ns و ۱ deg و ۳ deg و ۳ فرستنده و ۴ گیرنده در فاصله نزدیک برای (a) TDOA تنها، (b) AOA تنها و (c) ترکیبی TDOA و AOA ترکیبی.



شکل (۵): مکان‌یابی در محدوده X و Y برای اندازه‌گیری‌های

TDOA و AOA زاویه سمت و ارتفاع با انحراف معیار خطای اندازه‌گیری به ترتیب برابر ۱۰۰ ns و ۱ deg و ۳ deg و ۳ فرستنده و ۴ گیرنده در فاصله دور برای (a) TDOA تنها، (b) AOA تنها و (c) ترکیبی TDOA و AOA ترکیبی.

جدول (۲): موقعیت حسگرهای گیرنده در چینش نزدیک			
موقعیت حسگر	x	y	z
۱	۰ km	۰ km	۱۰۰ m
۲	۱۰ km	۱۰ km	۲۰۰ m
۳	-۱۰ km	۱۰ km	۲۰۰ m
۴	۰ km	۲۰ km	۱۰۰ m

جدول (۳): موقعیت حسگرهای گیرنده در چینش دور			
موقعیت حسگر	x	y	z
۱	۰ km	۰ km	۱۰۰ m
۲	۵۰ km	۵۰ km	۲۰۰ m
۳	-۵۰ km	۵۰ km	۲۰۰ m
۴	۰ km	۱۰۰ m	۱۰۰ m

#### ۴-۱. تأثیر جغرافیای مسئله

فضای کارتیزین با گستره‌ای از متغیرهای x و y به ترتیب برابر  $x = [-150 \ 150]$  و  $y = [-10 \ 300]$  و ارتفاع هدف برابر 9km را در نظر می‌گیریم. مقدار RCRLB<sup>۱</sup> را در نقاط مختلف این فضا ارائه می‌دهیم. چند سناریوی مختلف چینش را بررسی می‌کنیم. فرض شده است حسگرها از اندازه‌گیری‌های TDOA و AOA زاویه سمت و ارتفاع استفاده می‌کنند. انحراف معیار خطای اندازه‌گیری برای اختلاف زمان ورود و زاویه ورود سمت و ارتفاع به ترتیب برابر ۱۰۰ ns و ۱ deg و ۳ deg برای نقاط مختلف فضا فرض شده است. همان‌طور که در شکل‌های (۳-۶) به ازای سناریوهای مختلف چینش حسگرهای گیرنده نشان داده شده است، پردازش متمرکز کانال‌های مراقبت-مراقبت برای به دست آوردن اندازه‌گیری‌های TDOA و غیرمتمرکز کانال مراقبت برای به دست آوردن اندازه‌گیری‌های AOA فرض شده است. در این شکل‌ها مقدار RCRLB برای نقاط مختلف فضا در ۳ حالت استفاده از اندازه‌گیری TDOA تنها در شکل‌های (a)، استفاده از اندازه‌گیری AOA تنها در شکل‌های (b) و استفاده از اندازه‌گیری‌های توأم TDOA و AOA در شکل‌های (c) نشان داده شده است. همان‌طور که مشهود است استفاده ترکیبی از اندازه‌گیری‌های TDOA و AOA معایب استفاده تنها از آنها را بهبود می‌دهد.

همان‌طور که مشهود است. استفاده از اندازه‌گیری‌های TDOA تنها دارای نقاط کور در راستای خط اتصال حسگرهای گیرنده است. با توجه به معادله (۱۵) در نقاطی که فاصله آنها از حسگرها تقریباً برابر است تفاضل به سمت صفر و در نتیجه مقدار CRLB به سمت بی نهایت می‌رود. در مقابل استفاده از اندازه‌گیری‌های AOA تنها دارای دقت برد مکان‌یابی کمی نسبت به TDOA است. با دقت در معادله (۱۶) نسبت به معادله (۱۵)

<sup>۱</sup> Root Cramer Rao Lower Bound

می‌توان سیگنال‌های بازتاب تشعشع فرستنده‌های مختلف از هدف را در گیرنده‌ها جداسازی کرد. مقدار RCRLB برای نقاط مختلف این گستره در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌طور که نشان داده شده است، خطا محدود به 30km است. این افزایش تعداد فرستنده‌ها به افزایش تعداد اندازه‌گیری‌ها می‌انجامد که باعث بهبود حدود نصف خطای مکان‌یابی شده است.

#### ۴-۱-۳. یک فرستنده و حسگرهای گیرنده دور

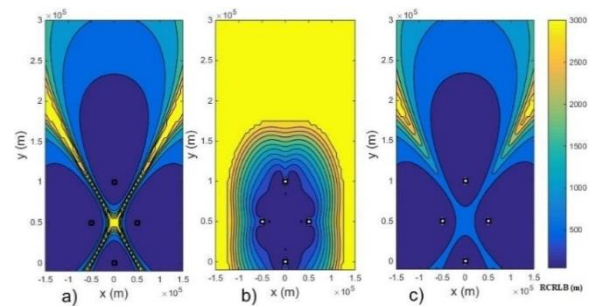
در این سناریو مکان حسگرهای گیرنده مطابق جدول (۳) و تنها یک فرستنده اول جدول (۱) در نظر گرفته می‌شود. مقدار RCRLB برای نقاط مختلف این گستره در شکل (۵) نشان داده شده است. همان‌طور که نشان داده شده است، خطا محدود به 5km است. این افزایش تقریباً ۵ برابر فاصله حسگرهای گیرنده باعث بهبود خطای مکان‌یابی حدود ۱۰ برابر شده است.

#### ۴-۱-۴. سه فرستنده و حسگرهای گیرنده دور

در این سناریو مکان حسگرهای فرستنده را مطابق جدول (۱) و حسگرهای گیرنده را مطابق جدول (۳) در نظر می‌گیریم. شبکه فرستنده‌ها به صورت MFN در نظر گرفته می‌شود و فرض می‌شود می‌توان سیگنال‌های بازتاب تشعشع فرستنده‌های مختلف از هدف در گیرنده‌ها قابل جداسازی است. مقدار RCRLB برای نقاط مختلف این گستره در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که نشان داده شده است، خطا محدود به 3km است. افزایش تعداد فرستنده‌ها که به افزایش تعداد اندازه‌گیری‌ها می‌انجامد و باعث بهبود حدود نصف خطای مکان‌یابی شده است. همچنین در مقایسه با حالت مشابه فاصله نزدیک حسگرهای گیرنده خطا حدود ۱۰ برابر بهبود یافته است.

#### ۴-۲. تأثیر خطای اندازه‌گیری‌ها

در این بخش تأثیر خطای اندازه‌گیری‌ها بر کارایی تخمین را با بررسی باند پایین تخمین RCRLB ارائه می‌کنیم. هدف را در نقطه  $p_{Ta} = [40km \ 150km \ 9km]^T$  و فرستنده‌ها را مطابق جدول (۱) و چینش حسگرهای گیرنده را به دو صورت فاصله نزدیک و دور در جدول (۲) و جدول (۳) در نظر می‌گیریم. به دلیل فاصله دور هدف تا حسگرهای گیرنده و فرستنده مدل هدف را نقطه‌ای در نظر می‌گیریم و از اندازه‌گیری‌های GROA نیز استفاده می‌کنیم که مستقل از RCS هدف است. منحنی‌های RCRLB به ازای وجود اندازه‌گیری‌های TDOA، تنها، AOA، تنها، TDOA و AOA توأم و GORA و TDOA توأم بر حسب تغییرات دقت TDOA، AOA، GROA و AOA به ترتیب در شکل‌های (۷)، (۸) و (۹) نشان داده شده است. در این شکل‌ها نتایج RCRLB برای چهار نوع چینش مشابه شکل‌های (۲-۵) بررسی شده است. حالت‌های یک فرستنده و ۴ حسگر گیرنده در فاصله



شکل (۶): RCRLB مکان‌یابی در محدوده X و Y برای اندازه‌گیری‌های TDOA و AOA زاویه سمت و ارتفاع با انحراف معیار خطای اندازه‌گیری به ترتیب برابر ۱۰۰ ns و ۱ deg و ۳ deg با ۳ فرستنده و ۴ گیرنده در فاصله دور برای (a) تنها TDOA، (b) تنها AOA و (c) AOA و TDOA ترکیبی.

از سوی دیگر همان‌طور که مشهود است، قرار دادن حسگرهای گیرنده در فاصله دور باعث بهبود چشمگیر مکان‌یابی می‌شود. دقت مکان‌یابی برای یک نقطه مشخص تحت حالت‌های مختلف شکل‌های (۳-۶) در جدول (۴) ارائه شده است. همان‌طور که مشهود است، با ۵ برابر کردن فاصله حسگرهای گیرنده در چینش دور نسبت به چینش نزدیک خطای مکان‌یابی برای حالت TDOA تنها و توأم TDOA و AOA حدود ۲۰ برابر و در حالت AOA تنها حدود ۷ برابر بهبود یافته است.

جدول (۴): RCRLB مکان‌یابی در چینش‌ها و اندازه‌گیری‌های مختلف برای هدف در $p_{Ta} = [40km \ 150km \ 9km]^T$			
			نوع چینش
TDOA & AOA	AOA	TDOA	نوع اندازه‌گیری
۷۶۱۳m	۲۶۵۳۰m	۸۰۴۳m	تک فرستنده و گیرنده‌های نزدیک
۴۳۹۵m	۱۵۳۲۰m	۴۶۴۴m	سه فرستنده گیرنده‌های نزدیک
۳۵۳m	۳۷۶۰m	۳۵۵m	تک فرستنده و گیرنده‌های دور
۲۰۳m	۲۰۰m	۲۰۵m	سه فرستنده گیرنده‌های دور

#### ۴-۱-۱. یک فرستنده و حسگرهای گیرنده نزدیک

در این سناریو مکان حسگرهای گیرنده مطابق جدول (۲) و تنها یک فرستنده اول جدول (۱) در نظر گرفته شده است. مقدار RCRLB برای نقاط مختلف این گستره در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که نشان داده شده است، خطا محدود به 50km است. استفاده توأم از اندازه‌گیری‌ها باعث بهبود خطا در کل فضا و رفع نقاط کور در استفاده تنها از اندازه‌گیری‌های TDOA و حساسیت برد AOA شده است.

#### ۴-۱-۲. سه فرستنده و حسگرهای گیرنده نزدیک

در این سناریو مکان حسگرهای فرستنده را مطابق جدول (۱) و حسگرهای گیرنده را مطابق جدول (۲) در نظر می‌گیریم. شبکه فرستنده‌ها به صورت MFN در نظر گرفته می‌شود و فرض می‌شود



### ۲-۱-۴. خطای اندازه‌گیری TDOA

در شکل (۷) مقدار RCRLB برای تغییر انحراف معیار خطای TDOA از 10ns الی 1us نمایش داده شده است. انحراف معیار خطای اندازه‌گیری‌های AOA زاویه سمت و ارتفاع به ترتیب 1deg و 3deg و GROA برابر 15dB- در نظر گرفته شده است. همان‌طور که نشان داده شده است حالت‌های ترکیبی دارای دقت بهتری هستند. همان‌طور که مشهود است حالت‌های چند فرستنده بهتر از تک فرستنده و فاصله دور حسگرها بهتر از فاصله نزدیک آنها است.

همان‌طور که مشهود است همواره ترکیب اندازه‌گیری‌ها به کارایی بهتر می‌انجامد و این خاصیت به ازای تغییرات دقت اندازه‌گیری ثابت است. حالت ترکیب اندازه‌گیری‌ها دارای کارایی بهتر از استفاده تنها از هر یک از اندازه‌گیری‌ها است. CRLB استفاده توأم از اندازه‌گیری‌ها متأثر از اندازه‌گیری با CRLB پایین‌تر است. در محدوده‌ای که CRLB اندازه‌گیری‌ها بهم نزدیک است بهبود CRLB با استفاده توأم از اندازه‌گیری‌ها مشهودتر است. در شکل‌های c و d مقادیر CRLB برای اندازه‌گیری‌های TDOA، TDOA، AOA و TDOA، AOA و GROA به هم نزدیک است.

### ۲-۲-۴. خطای اندازه‌گیری AOA

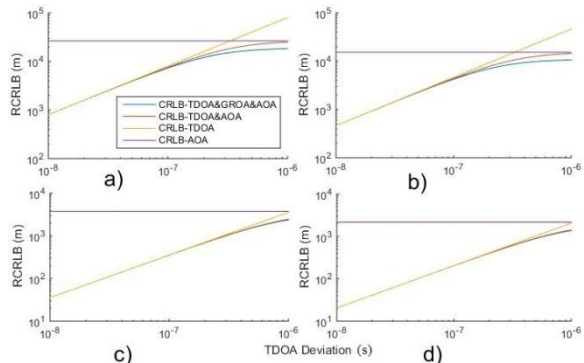
در شکل (۸) مقدار RCRLB برای تغییر انحراف معیار خطای AOA زاویه سمت از 0.1deg الی 3deg نمایش داده شده است.

انحراف معیار خطای اندازه‌گیری‌های AOA زاویه ارتفاع 3deg، TDOA برابر 100ns و GROA برابر 15dB- در نظر گرفته شده است. همان‌طور که نشان داده شده است حالت‌های ترکیبی دارای دقت بهتری هستند. همان‌طور که مشهود است حالت‌های چند فرستنده بهتر از تک فرستنده و فاصله دور بهتر از فاصله نزدیک آنها است. در شکل‌های c و d مقادیر CRLB برای اندازه‌گیری‌های TDOA، TDOA، AOA و TDOA، AOA و GROA به هم نزدیک است.

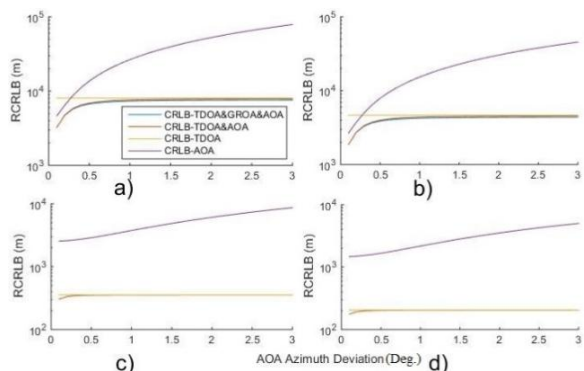
### ۲-۳-۴. خطای اندازه‌گیری GROA

در شکل (۹) مقدار RCRLB برای تغییر انحراف معیار خطای GROA از 20dB الی 10dB- نمایش داده شده است. انحراف معیار خطای اندازه‌گیری‌های AOA زاویه سمت و ارتفاع به ترتیب 1deg و 3deg و TDOA برابر 100ns در نظر گرفته شده است. همان‌طور که نشان داده شده است حالت‌های ترکیبی دارای دقت بهتری هستند. همان‌طور که مشهود است حالت‌های چند فرستنده بهتر از تک فرستنده و فاصله دور حسگرها بهتر از

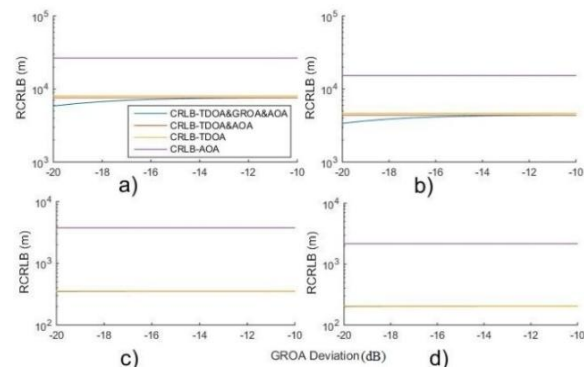
نزدیک و دور به ترتیب در شکل‌های (a) و (c) و حالت‌های ۳ فرستنده و ۴ حسگر گیرنده در فاصله نزدیک و دور به ترتیب در شکل‌های (b) و (d) نشان داده شده‌اند.



شکل (۷): RCRLB به ازای تغییرات انحراف معیار TDOA برای (a) یک فرستنده و ۴ حسگر گیرنده در فاصله نزدیک (b) ۳ فرستنده و ۴ حسگر گیرنده در فاصله نزدیک (c) یک فرستنده و ۴ حسگر گیرنده در فاصله دور (d) ۳ فرستنده و ۴ حسگر گیرنده در فاصله دور.



شکل (۸): RCRLB به ازای تغییرات انحراف معیار AOA زاویه سمت برای (a) یک فرستنده و ۴ حسگر گیرنده در فاصله نزدیک (b) ۳ فرستنده و ۴ حسگر گیرنده در فاصله نزدیک (c) یک فرستنده و ۴ حسگر گیرنده در فاصله دور (d) ۳ فرستنده و ۴ حسگر گیرنده در فاصله دور.



شکل (۹): RCRLB به ازای تغییرات انحراف معیار GROA برای (a) یک فرستنده و ۴ حسگر گیرنده در فاصله نزدیک (b) ۳ فرستنده و ۴ حسگر گیرنده در فاصله نزدیک (c) یک فرستنده و ۴ حسگر گیرنده در فاصله دور (d) ۳ فرستنده و ۴ حسگر گیرنده در فاصله دور.

نسبت به فاصله نزدیک بهبود می‌بخشد. با توجه به پردازش سیگنال‌های بازتاب بدون نیاز به دریافت سیگنال‌های فرستنده مرجع این دور کردن فاصله حسگرها ممکن بوده و کارایی را تا حد مطلوبی در منطقه تحت مراقبت بهبود می‌بخشد.

## ۶. مراجع

- [1] N. Willis and H. D. Griffiths, "Advances in Bistatic Radar," Scitech Pub Inc., 2007.
- [2] H. D. Griffiths and C. J. Baker, "An Introduction to Passive Radar," Artech House, 2017.
- [3] M. Cherniakov, "Bistatic Radar: Emerging Technology," JohnWiley & Sons Ltd, 2008.
- [4] M. Lockheed, "Silent Sentry®. Innovative Technology for Passive, Persistent Surveillance," Lockheed Martin, May 2007. [Online] Available: Lockheed Martin, <http://www.lockheedmartin.com/data/assets/10644.pdf>.
- [5] M. Skolnik, "Radar Handbook (2nd ed.)," USA: McGraw-Hill, 1990.
- [6] N. J. Willis, "Bistatic Radar," MD: Technology Service Corporation, 1995.
- [7] L. V. Blake, "Radar Range Performance Analysis," MA: Lexington Books, 1980.
- [8] L. V. Blake, "Radar Range Performance Analysis," MA: Artech House, 1986.
- [9] M. Skolnik, "An analysis of bistatic radar," IRE Transactions on Aerospace and Navigational Electronics, 1961.
- [10] H. Kuschel, D. Cristallini, and K. E. Olsen, "Tutorial: Passive radar tutorial," IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 34, no. 2, Feb. 2019.
- [11] H. Kuschel, et al, "Experimental passive radar systems using digital illuminators (DAB/DVB-T)," In Proceedings of the 2014 15th International Radar Symposium (IRS), 2007.
- [12] R. Zemhari, M. Broetje, G. Battistello, and U. Nickel, "GSM passive coherent location system: Performance prediction and measurement evaluation," IET Proceedings Radar, Sonar and Navigation, vol. 8, Feb. 2014.
- [13] F. Colone, P. Falcone, C. Bongioanni, and P. Lombardo, "WiFi-based passive bistatic radar: Data processing schemes and experimental results," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 48, Apr. 2012.
- [14] M. Cherniakov, R. Saini, R. Zuo, and M. Antoniou, "Space-surface bistatic synthetic aperture radar with global navigation satellite system transmitter of opportunity experimental results," IET Proceedings Radar, Sonar and Navigation, vol. 1, Dec. 2007.
- [15] X. He, T. Zeng, and M. Cherniakov, "Signal detectability in SS-BSAR with GNSS non cooperative transmitter," IEE Proceedings—Radar, Sonar and Navigation, vol. 152, Jun. 2005.

فاصله نزدیک آنها است. در شکل‌های c و d مقادیر CRLB برای اندازه‌گیری‌های TDOA، TDOA، AOA و GROA و AOA به هم نزدیک است.

## ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله سناریوهای محاسبه اندازه‌گیری‌ها در رادار غیرفعال برای مکان‌یابی اهداف با استفاده از پردازش سیگنال‌های بازتاب در کانال مراقبت ارائه شد. این سناریو برای اندازه‌گیری‌های TDOA، GROA و AOA برای مکان‌یابی هدف بررسی شد. اندازه‌گیری‌ها تحت سناریوهای متفاوت شبکه فرستنده‌های فرصت‌طلب شامل شبکه فرستنده‌ها در فرکانس‌های مجزا (MFN) یا در یک فرکانس (SFN) نیز بررسی شد. هر حسگر گیرنده با دریافت سیگنال بازتاب هدف توسط آرایه‌ای از آنتن‌های همه جهتی می‌تواند به آشکارسازی و محاسبه اندازه‌گیری‌ها بپردازد. با پردازش سیگنال‌های دریافتی در حسگرهای گیرنده و محاسبه اختلاف زمان ورود سیگنال (TDOA) یا نسبت توان ورود سیگنال (GROA) یا جهت ورود سیگنال (DOA) و یا ترکیبی از آنها می‌توان به مکان‌یابی هدف در حسگر مرکزی پرداخت. در این مقاله پردازش سیگنال‌های بازتاب مستقل از سیگنال فرستنده بررسی گشت. همان‌طور که بیان شد، اندازه‌گیری‌های TDOA و GROA از پردازش متمرکز سیگنال‌های دریافتی حسگرهای گیرنده در حسگر مرکزی به دست می‌آید. اندازه‌گیری‌های DOA نیز با پردازش غیرمتمرکز سیگنال کانال مراقبت در حسگرهای گیرنده به دست می‌آید.

باند پایین خطای تخمین CRLB به‌عنوان معیاری برای ارزیابی این سناریوی مکان‌یابی رادار غیرفعال ارائه شده است. CRLB ارائه‌شده برای تمامی سناریوها و انواع اندازه‌گیری‌های مورد استفاده برای مکان‌یابی هدف شامل TDOA و/یا GROA و/یا AOA ارائه شده است. همان‌طور که در نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده است، ترکیب انواع اندازه‌گیری‌ها همواره به دقت بهتر مکان‌یابی هدف می‌انجامد. همچنین ترکیب اندازه‌گیری‌ها می‌تواند معایب استفاده تکی از آنها از قبیل نقاط کور در استفاده از اندازه‌گیری‌های TDOA تنها که در نقاطی از فضا که فاصله تقریباً برابر تا حسگرهای گیرنده دارد رخ می‌دهد و حساسیت دقت به برد در استفاده تکی از اندازه‌گیری‌های AOA که متناسب با مجذور برد کاهش می‌یابد را تا حد مطلوبی رفع کند. همچنین با توجه به سناریوهای چینش مختلف قرار دادن حسگرهای گیرنده در فواصل دور کارایی مکان‌یابی را به‌صورت چشمگیری

- [24] J. Wang, Z. Qin, S. Wei, Z. Sun, and H. Xiang, "Effects of nuisance variables selection on target localisation accuracy in multistatic passive radar," *Electronics Letters*, vol. 54, no. 19, 2018.
- [25] D. E. Hack, L. K. Patton, B. Himed, and M. A. Saville, "Detection in Passive MIMO Radar Networks," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 62, no. 11, Jun. 2014.
- [26] D. E. Hack, L. K. Patton, B. Himed, and M. A. Saville, "Centralized Passive MIMO Radar Detection Without Direct-Path Reference Signals," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 62, no. 11, Jun. 2014.
- [27] Y. Zhang and K. C. Ho, "Multistatic Localization in the Absence of Transmitter Position," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 67, no. 18, 2019.
- [28] S. F. Talari and K. Mohamedpour, "Passive Source Localization Using Joint TDOA, GROA, and AOA Measurements," *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers (In proceeding)*, vol. 16, 2019.
- [29] S. F. Talari and K. Mohamedpour, "Sensors and target geometry effects on paA-PMHT for Multistatic Passive Radar Multitarget Tracking in Dense Clutter Environment," *IEEE Access*, vol. 7, 2019.
- [30] D. Reid, "An algorithm for tracking multiple targets," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 24, Dec. 1979.
- [31] P. S. Coraluppi and C. A. Carthel, "Multiple-Hypothesis Tracking for Targets Producing Multiple Measurements," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 54, no. 3, 2018.
- [32] X. Li, C. Zhao, X. Lu, and W. Wei, "A-PMHT for Multistatic Passive Radar Multitarget Tracking in Dense Clutter Environment," *IEEE Access*, vol. 7, 2019.
- [33] S. M. Kay, "Fundamentals of Statistical Signal Processing," *Estimation theory*, Prentice-Hall, 2007.
- [16] D. Cristallini, M. Caruso, P. Falcone, D. Langellotti, C. Bongioanni, F. Colone, et al, "Space-based passive radar enabled by the new generation of geostationary broadcast satellites," In *Proceedings of the 2010 IEEE Aerospace Conference*, Mar. 2010.
- [17] M. Cherniakov, R. Saini, R. Zuo, and M. Antoniou, "Space-surface bistatic synthetic aperture radar with global navigation satellite system transmitter of opportunity experimental results," *IET Proceedings Radar, Sonar and Navigation*, vol. 1, Dec. 2007.
- [18] M. Ahmadi, K. Mohamedpour, M. Alaie, and M. A. Sebt, "Moving targets detecting in the phased array distributed airborne MIMO radar using a generalized sub-space detector," *IHU Radar*, vol. 2, no. 1, 2014. (In Persian)
- [19] A. Gholipour, B. Zakeri, and K. Moafinezad, "Near field target localization in the non homogeneous environments," *IHU Radar*, vol. 4, no.1, 2016. (In Persian)
- [20] J. Wang, Z. Qin, F. Gao, and S. Wei, "An Approximate Maximum Likelihood Algorithm for Target Localization in Multistatic Passive Radar," *Chinese Journal of Electronics*, vol. 28, no. 1, 2019.
- [21] J. H. Huang, J. L. Garry, and G. E. Smith, "Array-based target localisation in ATSC DTV passive radar," *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 13, no. 8, 2019.
- [22] S. Zhang, Z. Huang, X. Feng, J. He, and L. Shi, "Multi-Sensor Passive Localization Using Second Difference of Coherent Time Delays With Incomplete Measurements," *IEEE Access*, vol. 7, 2019.
- [23] J. H. Huang, J. L. Garry, and G. E. Smith, "Array-based target localisation in ATSC DTV passive radar," *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 13, no. 8, 2019.

# **Investigating the Influence of Various Measurements and Sensor Arrangements on Target Location Estimation by Processing the Surveillance Signals in Multi-Transmitter Multi-Receiver Passive Radar**

**S. Fooladi Talari, K. Mohamedpour<sup>\*</sup>**

<sup>\*</sup> K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 01/10/2019, Accepted: 06/06/2020)

## **Abstract**

Passive radar research has many applications in military and commercial fields. In this paper, we investigate the scenarios of surveillance signal processing in multi-transmitter and multi-receiver passive radar. These scenarios include centralized processing of the received signals reflected from the target at the central sensor and decentralized processing of the reflected signals at the receiving sensors. Different types of possible measurements including time difference of arrival (TDOA), gain ratio of arrival (GROA), angle of arrival (AOA), and their combinations are presented under different scenarios. To calculate TDOA and GROA measurements, the centralized processing and for calculation of AOA measurements, the decentralized processing of surveillance signals are performed. The impact of different signal processing scenarios and types of measurements on the efficiency of target location estimation has been investigated by the CRLB. As shown in the simulation results, the combined use of the measurements is always better than their individual employment and, the far-field placement of receiving sensors, significantly improves the efficiency.

**Keywords:** MIMO Passive Radar, Multi transmitter multi receiver radar, Target localization, Surveillance signals processing, Cramer Rao Lower bound

---

<sup>\*</sup> Corresponding author E-mail: kmpour@kntu.ac.ir