

---

## Optimization of Site Topologies and Delay Extraction in Radar Emitter Location

R. Kabiri<sup>1</sup>, A. Kermani<sup>2\*</sup>, M. Sarijlu<sup>3</sup>, M. Asgharpoor Salkuyeh<sup>4</sup>

1,3- Imam Hossein University, 2,4- Electrical Department, Iran university of science and technology  
(Receive: 2013/07/29, Accept: 2014/04/10)

### ***Abstract***

*Nowadays, localization of moving objects has attracted a lot of attention. In this regard, several algorithms to detect and track various objects are presented. As an example, localization by measuring the time differences of arrival signals (TDOA) can be mentioned. This method which is used in passive radars is based on the time differences between the signals sent from the transmitter to a number of different receivers. The purpose of this research has been to implement TDOA method and select the optimal method to estimate the system error and evaluate its ambiguity. According to the arguments presented in this manuscript Circular Error Probability criteria (CEP) is introduced as a criterion for the evaluation of performance of TDOA based radars, and finally optimized site positions are developed to achieve the lowest error by means of this criterion. Simulation results show improved performance of criterion selection on optimizing topology and accurate localization of TDOA radars, consequently.*

### **Keywords:**

TDOA, Passive Radars, CEP

---

\*Corresponding Author Email: a\_kermani@elec.iust.ac.ir

## بهینه‌سازی مکانی و استخراج تأخیر در مکان‌یاب راداری

رحمان کبیری<sup>۱</sup>، علی کرمانی<sup>۲\*</sup>، محمد ساریجلو<sup>۳</sup>، مصطفی اصغرپور سالکویه<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکترا، دانشگاه امام حسین<sup>(ع)</sup>، ۲- دانشجوی دکترا، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده برق

۳- کارشناسی ارشد، دانشگاه امام حسین<sup>(ع)</sup>، ۴- دانشجوی دکترا، مخابرات سیستم، دانشگاه علم و صنعت ایران

( دریافت: ۹۲/۷/۵، پذیرش: ۹۳/۱/۲۱ )

### چکیده

مسئله مکان‌یابی دقیق و قابل اعتماد اجسام سیار، امروزه توجه بسیاری را به خود جلب نموده است. در این راستا، الگوریتم‌های گوناگونی با هدف کشف موقعیت و تعقیب مسیر حرکت اجسام مختلف ارائه گردیده است که از آن جمله می‌توان به الگوریتم مکان‌یابی براساس اندازه‌گیری اختلاف زمانی اشاره نمود. این نوع مکان‌یابی که در رادارهای غیرفعال کاربرد دارد، مبتنی بر اختلاف زمانی بین دریافت سیگنال ارسال شده از طرف فرستنده در چند گیرنده مختلف می‌باشد. هدف این پژوهش، پیاده‌سازی روش ذکرشده و انتخاب روشی بهینه جهت تخمین خطای سیستم و ارزیابی نقاط ابهام آن می‌باشد. با توجه به مستندات و قضایای ارائه شده در این مقاله، معیار احتمال خطای دایروی به عنوان معیاری برای ارزیابی کیفیت عملکرد رادارهای مبتنی بر اندازه‌گیری اختلاف زمانی معرفی شده و در نهایت با استفاده از این معیار مکانی بهینه برای دستیابی به کمترین خطا معرفی شده است. نتایج شبیه‌سازی، عملکرد مناسب روش انتخابی این معیار، را در مکانی و همچنین دقت مطلوب مکان‌یابی را در مورد رادارهای مبتنی بر اندازه‌گیری اختلاف زمانی بهینه‌شده، نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** رادارهای TDOA، مکان‌یابی به روش غیرفعال، معیار احتمال خطای دایروی

### ۱. مقدمه

و به دنبال یافتن جهت سیگنال ارسال می‌باشد. بنابراین اگر یک مقدار جهت سیگنال دریافتی یافت گردد، آنگاه می‌توان اینطور فرض نمود که فرستنده سیگنال لزوماً در راستای همان جهت قرار دارد و می‌توان از رادار گیرنده در همان راستا یک خط بین فرستنده و گیرنده فرض نمود. اما در این شرایط قادر به تعیین مکان دقیق فرستنده نمی‌باشیم. اما اگر حداقل ۲ مقدار برای زاویه دریافتی سیگنال وجود داشته باشد یا به عبارت دیگر، دو رادار داشته باشیم که جهت فرستنده را تخمین زده باشند، آنگاه می‌توان مکان دقیق فرستنده را محل تقاطع خطوط فرضی‌ای دانست که در راستای جهت‌های تشخیص داده‌شده توسط هر رادار رسم گردیده است.

معمولاً تعداد بیشتری تخمین از جهت فرستنده مورد نیاز است تا بتوان مکان دقیق فرستنده را از تقاطع خطوط فرضی مذکور استخراج نمود. اگرچه تکنیک جهت دریافت، روشی عملی برای یافتن مکان گره‌های متحرک ارائه می‌نماید، اما اشکال‌های مهمی در

مکان‌یابی اهداف به دو صورت فعال و غیرفعال امکان‌پذیر می‌باشد. در روش فعال، رادار با ارسال پرتو در محیط و بررسی پرتو بازگشتی، حضور اشیاء متحرک در محیط را درک می‌نماید. در این روش، برخلاف کارایی بسیار خوب، محرمانگی حضور رادار به مخاطره می‌افتد. در واقع به این ترتیب، هدف متحرک نیز متوجه حضور رادار می‌گردد.

در روش مکان‌یابی به‌صورت غیرفعال، رادار با بررسی سیگنال‌هایی که از طرف هدف ساطع می‌گردند به موقعیت هدف پی می‌برد. در این روش، محرمانگی مکان رادار به خطر نمی‌افتد. تمرکز اصلی این مقاله بر روی روش‌های مکان‌یابی غیرفعال می‌باشد.

یکی از ابتدایی‌ترین این فنون روش مکان‌یابی براساس زاویه دریافتی سیگنال<sup>۱</sup> است. این فن گاهی اوقات تکنیک جهت دریافت<sup>۲</sup> هم نامیده می‌شود. این روش، از سیستم‌های چندآنتنی<sup>۳</sup> بهره می‌برد

2. Direction of Arrival (DOA)  
3. Multi Array Antenna

\* رایانامه نویسنده مسئول: a\_kermani@elec.iust.ac.ir  
1. Angle of Arrival (AOA)

می‌انجامد برابر است با زمان پیموده شدن مسافت بین فرستنده و گیرنده به صورت رفت و برگشت و همچنین مدت زمانی که گیرنده صرف ارزیابی و پردازش پیام دریافتی و سپس ارسال می‌نماید. اگر مدت زمانی که برای پردازش و ارسال پیام از طرف گیرنده در نظر گرفتیم با دقت مناسبی در دسترس باشد، می‌توانیم این زمان را از زمان کل کم نموده و به تأخیر کل مسیر رفت و برگشت دست یافت. نصف این زمان تأخیر می‌تواند برای محاسبه فاصله بین فرستنده و گیرنده مورد استفاده قرار گیرد. اگر این تأخیر به‌ازای سه آنتن مختلف در اختیار باشد می‌توان به کمک روش سه‌گوش‌سازی<sup>۴</sup> به مکان دقیق فرستنده دست یافت. مشکلات اساسی‌ای در این روش مشاهده می‌گردد. تأخیر مورد نظر در پاسخ‌گویی در سمت فرستنده به سختی قابل محاسبه می‌باشد. دلیل این مشکل، تفاوت‌های ساختاری موجود در بین فرستنده‌های متفاوت می‌باشد. از سوی دیگر، این روش به‌شدت به وجود مسیر دید مستقیم وابسته می‌باشد.

یکی دیگر از این فنون، روش براساس اختلاف زمانی سیگنال‌های دریافتی<sup>۵</sup> است که بر مبنای تأخیرهای موجود بین دریافت سیگنال در آنتن‌های مختلف برقرار می‌باشد. این کار معمولاً با به کمک گرفتن یک تصویر لحظه‌ای از سیگنال دریافتی در آنتن‌های مختلف صورت می‌گیرد. به این منظور، بین سیگنال‌های دریافتی توسط گیرنده‌های مختلف، مقدار همبستگی محاسبه گردیده و به کمک یافتن مقدار تأخیری که این همبستگی را حداکثر می‌سازد، میزان تأخیر بین دو سیگنال دریافتی در دو آنتن مختلف محاسبه می‌گردد. به کمک یک مقدار مشخص برای تأخیر بین دریافت دو سیگنال در دو آنتن متفاوت، می‌توان مکان هندسی فرستنده را بر روی هذلولی‌ای که بین دو گیرنده و به کمک مقدار اختلاف زمانی بین آنها تعریف می‌گردد، فرض نمود [۴].

اگر روند فوق را بین دو آنتن گیرنده دیگر که یکی از آنها با آنتن‌های مرحله قبل مشترک باشد اجرا نماییم، هذلولی دیگری نیز به این ترتیب تعریف می‌گردد. حال می‌توان محل تقاطع این دو هذلولی را موقعیت واقعی فرستنده دانست. البته تعریف هذلولی‌ها با فرض هم‌صفحه بودن گیرنده‌ها و فرستنده می‌باشد. به این روش، روش مکان‌یابی هذلولوی هم می‌گویند [۵].

این روش، مزایای بسیار زیادی نسبت به سایر روش‌ها دارد. از آنجایی‌که تمامی محاسبات در سطح ابتدایی صورت می‌گیرد، لذا نیاز به هیچ تغییری در فرستنده نمی‌باشد. به همین دلیل این روش

این روش موجود می‌باشد. برای آنکه تخمین جهت توسط آنتن دریافتی به صورت صحیح صورت گیرد لازم است که حتماً سیگنال دریافتی، مسیری مستقیم را طی نموده باشد. به بیان دیگر، باید حتماً یک مسیر خط مستقیم<sup>۱</sup> بین فرستنده و گیرنده وجود داشته باشد. بدون تردید چنین چیزی در محیط بی‌سیم خصوصی مناطق شهری که به‌شدت دچار اهداف سایه هستند، امکان‌پذیر نمی‌باشد. فاکتور مهم تأثیرگذار دیگر، هزینه سنگین نصب آنتن‌های آرایه‌ای می‌باشد [۱].

هرچند آنتن‌های وقتی امکان ارائه ظرفیت بیشتر برای سیستم‌های بی‌سیم را تضمین می‌نمایند، لیکن این آنتن‌ها تنها در شرایطی کاربرد دارند که به دنبال افزایش ظرفیت برای سیستم باشیم. بنابراین در نواحی حومه شهر که دارای جمعیت نسبتاً اندکی می‌باشند، نصب چندین آنتن دارای توجیه اقتصادی نمی‌باشد. حتی اگر تعدادی از آرایه‌های چند آنتنی در محیط نصب هم شده باشد، باید به‌طور کامل موقعیت آنها کالیبره شده باشد. در غیر این صورت، تغییرات بسیار اندک حتی به اندازه یک دقیقه در مکان آنتن‌های آرایه‌ای بر اثر حوادثی نظیر باد و طوفان، به این دلیل که این مکان‌ها به‌عنوان مرجع برای محاسبه مقدار زاویه دریافتی سیگنال مورد استفاده قرار می‌گیرند، می‌تواند منجر به پیدایش خطایی بزرگ در محاسبات گردد.

بنابراین به روشی برای ثابت کردن مکان آنتن‌ها به‌طور کاملاً مستحکم نیازمندیم یا این‌که باید به کمک روشی به‌صورت مداوم آنتن‌ها را کالیبره نماییم. مشکل دیگر این روش پیچیدگی بالای آن است [۲]. اگرچه در این زمینه استثنائاتی نظیر الگوریتم معرفی شده در مقاله آقای لیو و همکاران<sup>۲</sup> نیز وجود دارد، لیکن این الگوریتم‌ها عمدتاً به دلیل نیاز به اندازه‌گیری‌های دقیق، ذخیره و به‌کارگیری اطلاعات کالیبراسیون آرایه‌ها و نیز پیچیدگی ذاتی کالیبراسیون این آنتن‌ها، دارای پیچیدگی‌های ذاتی می‌باشند [۲].

در روشی دیگر، این امکان وجود دارد که ایستگاه پایه به‌صورت غیر مستقیم، زمان انتقال سیگنال از فرستنده تا گیرنده را در مسیری که مستقیم یا معکوس طی می‌نماید را محاسبه نماید. این فن، روش مکان‌یابی براساس زمان دریافتی سیگنال<sup>۳</sup> نامیده می‌شود [۲ و ۳]. این کار می‌تواند به کمک اندازه‌گیری زمانی که طول می‌کشد تا گیرنده، به پیام یا دستوری که از طرف فرستنده ارسال شده است پاسخ بگوید صورت گیرد. کل زمانی که از لحظه ارسال پیام از طرف فرستنده تا لحظه دریافت پاسخ آن از طرف گیرنده به طول

4. Triangulation

5. Time Differences of Arrival signals (TDOA)

1. Line of Sight (LOS)

2. ESPRIT

3. Time of Arrival (TOA)

مقادیر اختلاف زمانی به معادلات هذلولوی تبدیل گردیده و سپس به کمک روش‌هایی، جواب صحیح یافت می‌گردد.

اختلاف زمانی بین سیگنال‌ها به کمک دو روش قابل تخمین است:

(۱) تفریق مقادیر تخمین‌زده‌شده زمان دریافت<sup>۲</sup> از دو فرستنده پایه متفاوت به منظور به دست آوردن اختلاف زمانی نسبی.

(۲) از طریق محاسبه همبستگی بین سیگنال‌های دریافتی در دو سایت متفاوت.

راهکار اول، زمانی قابل استفاده است که تخمین دقیقی از زمان دریافتی در اختیار باشد. در چنین شرایطی هیچ مزیتی در تبدیل TOA به TDOA وجود ندارد زیرا می‌توان به راحتی به کمک زمان‌های دریافتی محاسبه شده، مکان دقیق فرستنده را تخمین زد.

اما این تنها در شرایطی عملی است که زمان دقیق ارسال اطلاعات توسط فرستنده در دسترس باشد. اگر هیچ مرجع زمانی‌ای در فرستنده نداشته باشیم، این روش قابل استفاده نمی‌باشد. به دلیل عدم حضور یک مرجع زمانی در فرستنده، معمول‌ترین روش تخمین اختلاف زمانی که مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش محاسبه همبستگی است.

همزمانی‌ای که در این سیستم‌ها مورد نیاز می‌باشد، هم‌زمانی بین گیرنده‌ها است که از جهت عملی، پیاده‌سازی آن به مراتب راحت‌تر از حالت قبل می‌باشد. به دلیل اهمیت این روش، در ادامه آن را به طور مجزا تشریح می‌نماییم.

## ۱.۲. مدل ریاضی در محاسبه همبستگی

سیگنال  $S(t)$  را در محیط آلوده به نویز و چند مسیری در نظر بگیرید. مدل عمومی برای تخمین زمان تأخیر بین سیگنال‌های دریافتی در دو ایستگاه پایه متفاوت،  $x_1(t)$  و  $x_2(t)$  به صورت زیر است:

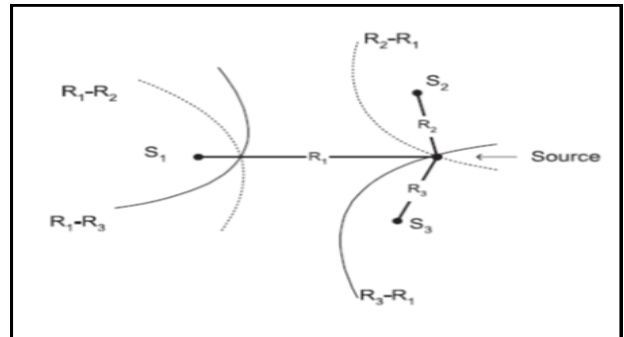
$$\begin{aligned} x_1(t) &= A_1 S(t - d_1) + n_1(t) \\ x_2(t) &= A_2 S(t - d_2) + n_2(t) \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن،  $A_1$  و  $A_2$  ضرایب دامنه سیگنال،  $n_1(t)$  و  $n_2(t)$  نویز و تداخل و  $d_1$  و  $d_2$  تأخیرهای زمانی سیگنال می‌باشند. در این مدل فرض گردیده است که  $S(t)$  و  $n_1(t)$  و  $n_2(t)$  فرایندهایی حقیقی و ایستادن با میانگین صفر می‌باشند و  $S(t)$  با  $n_1(t)$  و  $n_2(t)$  ناهمبسته

به مراتب نسبت به روش‌های مبتنی بر سیستم مکان‌یابی جهانی<sup>۱</sup> برتری دارد. در ضمن، نیازی به دانستن زمان دقیق ارسال اطلاعات از طرف فرستنده - نظیر آنچه در روش TOA مورد نیاز است - هم نمی‌باشد. از سوی دیگر، چون این روش نیاز به هیچ نوع خاصی از آنتن ندارد (وابسته به نوع آنتن نیست) لذا مانند روش DOA سنگینی هزینه نصب آنتن‌های پیچیده را به طراح شبکه اعمال نمی‌نماید. این روش همچنین در مقابل اشکالات هم‌زمان‌سازی - در شرایطی که یک منبع قدرتمند تشعشع کننده سیگنال در نزدیکی فرستنده هدف قرار می‌گیرد - نیز مصونیت ایجاد می‌نماید.

اگر چنین منبعی بر روی سیگنال‌های دریافتی در آنتن تأثیر گذاشته باشد، میزان این تأخیر به کمک محاسبات مربوط به اختلاف دریافت زمانی سیگنال‌ها تقلیل می‌یابد. بنابراین، روش TDOA در شرایطی که دید مستقیم وجود ندارد نسبت به روش DOA و TOA برتری دارد [۶ و ۷].

در بخش ۲ به صورت خاص به تکنیک مکان‌یابی TDOA و بررسی مسایل و ابهامات موجود در این روش پرداخته می‌شود. در بخش ۳، معیار تخمین خطا و ارزیابی سایتینگ تعیین می‌شود و در انتها در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی الگوریتم مورد نظر و مقایسه آن با روش‌های کنونی ارائه خواهد شد.



شکل ۱. هذلولی‌های ایجادشده به کمک روش TDOA

## ۲. بررسی روش TDOA

در این بخش، روش TDOA معرفی گردیده و مزایای آن به سایر روش‌ها بیان شود. همچنین به جزئیات این روش بیشتر پرداخته و تکنیک‌های مختلف حل معادلات هذلولوی را شرح می‌دهیم.

تخمین هذلولوی در دو گام پیاده‌سازی می‌گردد. گام اول شامل تخمین اختلاف زمانی‌های سیگنال فرستنده از طریق محاسبه اختلاف زمانی دریافت آنها توسط گیرنده‌ها می‌باشد. در گام دوم،

می‌باشد. با مرجع قرار دادن دامنه و تأخیر در گیرنده‌ای که زودتر از بقیه گیرنده‌ها توانسته است سیگنال را دریافت نماید، رابطه (۱) به صورت زیر در می‌آید:

$$\begin{aligned}x_1(t) &= S(t) + n_1(t) \\x_2(t) &= AS(t-D) + n_2(t)\end{aligned}\quad (2)$$

که در آن،  $A$  نسبت دامنه‌ها و  $D=d_2 - d_1$  به دنبال یافتن  $D$  هستیم.  $D$  اختلاف زمانی بین دریافت  $S(t)$  بین دو گیرنده است. همچنین به دنبال یافتن ضریب  $A$  نیز می‌باشیم. با تخمین مقیاس دامنه‌ها، انتخاب گیرنده مناسب امکان‌پذیر می‌گردد. در ادامه، حد همبستگی گردشی و خودبستگی به صورت زیر محاسبه می‌گردند:

$$R_{x_2x_1}^\alpha(\tau) = AR_s^\alpha(\tau-D)e^{-j\pi\alpha D} + R_{n_2n_1}^\alpha(\tau) \quad (3)$$

$$R_{x_1}^\alpha(\tau) = R_s^\alpha(\tau) + R_{n_1}^\alpha(\tau) \quad (4)$$

$$R_{x_2}^\alpha(\tau) = |A|^2 |R_s^\alpha(\tau)e^{-j\pi\alpha D} + R_{n_2}^\alpha(\tau)| \quad (5)$$

که پارامتر  $\alpha$  در آن، فرکانس گردشی می‌باشد. اگر  $\alpha=0$  باشد، روابط بالا متناظر با روابط معمول خودبستگی و همبستگی می‌باشند.

اگر  $S(t)$  فرکانس گردشی  $\alpha$  را از خود نشان دهد که با  $\Pi_1(t)$  و  $\Pi_2(t)$  مشترک نمی‌باشد، آنگاه با استفاده از این مقدار  $\alpha$  در محاسبات (۳) تا (۵)، با متوسط‌گیری داریم:

$$R_{n_1}^\alpha(\tau) = R_{n_2}^\alpha(\tau) = R_{n_1n_2}^\alpha(\tau) \quad (6)$$

لذا فرم کلی برای محاسبه‌ی تأخیر بین دریافت سیگنال‌ها به صورت زیر می‌باشد:

$$R_{x_2x_1}^\alpha(\tau) = AR_s^\alpha(\tau-D)e^{-j\pi\alpha D} \quad (7)$$

$$R_{x_1}^\alpha(\tau) = R_s^\alpha(\tau) \quad (8)$$

$$R_{x_2}^\alpha(\tau) = |A|^2 |R_s^\alpha(\tau)e^{-j\pi\alpha D}| \quad (9)$$

تخمین دقیق اختلاف زمانی سیگنال‌های دریافتی، به تخمین تأخیرهای زمانی - که مقاومت در برابر نویز و تداخل دارند و می‌توانند مؤلفه‌های سیگنال چند مسیری را بازیابی کنند - نیازمندند. روش‌های متنوعی برای محاسبه مقدار  $D$  با دقت‌های متفاوت و درجات آزادی گوناگون ارائه گردیده‌اند. این روش‌ها شامل فنون‌های

## ۲.۲. روش حل معادلات مکان‌یابی برای سیستم‌های سه‌بعدی

مسئله مکان‌یابی فرستنده متحرک به صورت غیرفعال<sup>۱</sup> و به کمک اختلاف زمانی دریافت سیگنال در گیرنده‌ها، از جمله مباحث مطرح در رادار محسوب می‌گردد. در اکثر موارد، این مسئله با در نظر گرفتن موقعیت‌ها به صورت دوبعدی تا حد زیادی قابل حل می‌گردد. معمول‌ترین روش برای یافتن مکان فرستنده به صورت غیرفعال، استفاده از مقادیر تأخیر زمانی بین دو گیرنده برای تعریف منحنی‌هایی که با هم اختلاف فاصله زمانی ثابتی دارند می‌باشد. از آنجایی که این امر ثابت گردیده است که حداقل ۴ گیرنده برای تعیین موقعیت مکانی یک فرستنده نیاز می‌باشد، لذا تقاطع ۳ منحنی از منحنی‌های مذکور می‌تواند مکان یک فرستنده را به طور کامل در فضا مشخص نماید. این راه‌حل در واقع به کمک روش‌های عددی ارائه گردیده است؛ زیرا راه حل ساده‌ای برای یافتن پاسخ برای دستگاه‌های متشکل از معادلات سهموی چندبعدی وجود ندارد. در بسیاری از مواقع، این مسئله در رابطه با مکان‌یابی گره‌ای<sup>۹</sup> است که در یک صفحه دو بعدی در حال حرکت است و لذا تنها با قطع دادن دو منحنی می‌توان مکان فرستنده را تشخیص داد.

از جمله این موارد می‌توان به مکان‌یابی یک گره متحرک نظیر یک گوشی موبایل در اطراف یک ایستگاه ارسال و دریافت<sup>۱۰</sup> اشاره نمود. گاهی اوقات، فرستنده در موقعیتی قرار گرفته است که فاصله آن نسبت به گیرنده‌ها بسیار زیاد است. در این شرایط می‌توان جهت فرستنده را از روی شیب منحنی‌ها به دست آورد. در حالت دو بعدی این مسئله به صورت مکان تقاطع دو خط در می‌آید. اما در حالت سه‌بعدی مسئله پیچیده‌تر می‌شود.

یکی از مسائلی که در حل عددی همزمان دستگاه‌هایی که دارای معادلات چندبعدی هذلولوی هستند دارای اهمیت می‌باشد آن است که محل تقاطع این هذلولی‌های چندبعدی به ازای اندکی تغییر در

6. Band-Limited Spectral Correlation Ratio (BL-SPECCOR)  
7. Cyclic Prony  
8. Passive  
9. Node  
10. Base Transceiver Station (BTS)

1. Generalized Cross Correlation (GCC)  
2. Cyclic Cross Correlation (CCC)  
3. Cyclostationary  
4. Cyclic Cross Correlation (CYCCOR)  
5. Spectral Coherence Alignment (SPECCOA)

کحل در رابطه بالا،  $(x_i, y_i, z_i)$  مکان سنسور نام و  $(x_s, y_s, z_s)$  مکان فرستنده می‌باشد.

با بسط رابطه (۱۲) و جایگزین نمودن مقادیر  $D_i$  داریم:

$$\begin{aligned} x_i^2 - 2x_i x_s + x_s^2 + y_i^2 - 2y_i y_s + y_s^2 \\ + z_i^2 - 2z_i z_s + z_s^2 = (d_{i4} + D_4)^2, \quad i = 1, 3 \\ x_4^2 - 2x_4 x_s + x_s^2 + y_4^2 - 2y_4 y_s + y_s^2 \\ + z_4^2 - 2z_4 z_s + z_s^2 = D_4^2. \end{aligned} \quad (13)$$

در بالا راه حل مستقیم برای دسته معادلات (۱۰) مورد استفاده قرار گرفته است (یعنی در حالتی که:  $D_1 = d_{14} + D_4$ ).

در بعضی موارد، یک راه‌حل حداقل مربعات<sup>۱</sup> به‌عنوان جایگزین برای دسته معادلات (۱۰) وجود دارد.

با حل معادله چهارم از دسته معادلات رابطه (۱۳) به‌ازای فاصله مبدأ مکانی تا محل فرستنده که آن را با  $R_s^2$  داریم:

$$\begin{aligned} R_s^2 &\equiv x_s^2 + y_s^2 + z_s^2 \\ &= -(x_4^2 + y_4^2 + z_4^2) + D_4^2 + 2x_4 x_s + 2y_4 y_s + 2z_4 z_s \\ &= -R_4^2 + D_4^2 + 2x_4 x_s + 2y_4 y_s + 2z_4 z_s \end{aligned} \quad (14)$$

اگر رابطه فوق را در سه رابطه اول مربوط به دسته معادلات رابطه (۱۸-۲) جایگزین نماییم داریم:

$$\begin{aligned} R_i^2 - (d_{i4} + D_4)^2 + D_4^2 - R_4^2 &= 2x_i x_s + 2y_i y_s + 2z_i z_s \\ - 2x_4 x_s - 2y_4 y_s - 2z_4 z_s, \quad i = 1, 3 \end{aligned} \quad (15)$$

با حفظ جامعیت کار، گیرنده چهارم را به‌عنوان مبدأ در نظر می‌گیریم. به این ترتیب مختصات گیرنده چهارم به صورت زیر تغییر می‌یابد:

$$(x_4, y_4, z_4) = (0, 0, 0), R_4 = 0$$

با اعمال فرض فوق در رابطه (۱۵) داریم:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} R_1^2 - d_{14}^2 \\ R_2^2 - d_{24}^2 \\ R_3^2 - d_{34}^2 \end{bmatrix} - 2(x_s^2 + y_s^2 + z_s^2)^{1/2} \begin{bmatrix} d_{14} \\ d_{24} \\ d_{34} \end{bmatrix} \\ = 2 \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

محل مرکز یکی از هذلولی‌های چندبعدی به مقدار زیادی جابه‌جا می‌گردد. اما این مسئله در مورد گره‌های متقاطع وجود ندارد. این تفاوت به این دلیل است که هذلولی‌های چندبعدی، سطوحی را تعریف می‌نمایند که از هم به فاصله کاملاً مساوی قرار دارند. در خیلی از موارد، خطاهای موجود در اندازه‌گیری ممکن است یافتن راه حل برای این دستگاه‌ها را غیر ممکن سازند.

با در نظر گرفتن مسئله‌ی فوق و به خاطر داشتن پیچیدگی حل دستگاه‌های معادلات هذلولوی چندبعدی برای مکان‌یابی سه بعدی، سعی می‌گردد که این مسئله به‌صورتی در بیاید که بتوان از گره‌ها برای حل معادلات استفاده کرد.

برای حالت ۴ سنسوری، می‌توان فاصله‌ی فرستنده تا سنسور نام و تا سنسور نام را به‌صورت  $d_{ij}$  بر اساس متغیر نامعلوم  $D_i$  که فاصله فرستنده از سنسور نام می‌باشد بیان نمود:

$$\begin{aligned} d_{ij} &= D_i - D_j \quad i, j = 1, 4 \\ d_{ij} &= -d_{ji} \\ d_{ij} &= c(t_i - t_j) = c\Delta t \end{aligned} \quad (10)$$

که در رابطه بالا،  $\Delta t$  اختلاف زمانی دریافت سیگنال در گیرنده‌ها و  $c$  سرعت صوت می‌باشد.

در مورد  $d_{ij}$ ها هم روابط زیر باید برقرار باشند:

$$\begin{aligned} d_{12} &= d_{13} - d_{23} = d_{14} - d_{24} \\ d_{13} &= d_{12} + d_{23} = d_{14} - d_{34} \\ d_{14} &= d_{12} + d_{24} = d_{13} + d_{34} \\ d_{23} &= d_{13} - d_{12} = d_{24} - d_{34} \\ d_{24} &= d_{14} - d_{12} = d_{23} + d_{34} \\ d_{34} &= d_{14} - d_{13} = d_{24} - d_{23} \end{aligned} \quad (11)$$

تعریف فاصله از فرستنده تا سنسور را در نظر بگیرید. این تعریف به ۴ معادله منجر می‌گردد:

$$\begin{aligned} (y_i - y_s)^2 + (z_i - z_s)^2 &= D_i^2 \quad i = 1, 4 \\ D_1 &= (d_{12} + d_{13} + 2d_{14} + d_{34})/4 + D_4 \\ D_2 &= (-d_{12} + d_{23} + d_{14} + 2d_{24} + d_{34})/4 + D_4 \\ D_3 &= (-d_{13} - d_{23} + d_{14} + d_{24} + 2d_{34})/4 + D_4 \end{aligned} \quad (12)$$

در ضمن به خاطر می‌سپاریم که  $R_s^2 = D_4^2$  در صورتی که  $R_s^2 = D_4^2$  به‌طور سمبولیک رابطه (۱۶) را می‌توان به فرم زیر نوشت:

$$\Delta - 2R_s d = 2MX \quad (17)$$

که در آن:

$$\Delta = \begin{bmatrix} R_1^2 - d_{14}^2 \\ R_2^2 - d_{24}^2 \\ R_3^2 - d_{34}^2 \end{bmatrix} \quad d = \begin{bmatrix} d_{14} \\ d_{24} \\ d_{34} \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} \quad M = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{bmatrix}$$

در شبیه‌سازی‌های مربوط به این پروژه، زمانی که دو جواب حقیقی برای این معادلات یافت می‌شود، با توجه به محدوده ناحیه‌ای که مورد بررسی قرار می‌گیرد، تنها یکی از دو نقطه به دست‌آمده در محدوده قرار می‌گیرد. در شرایطی که برای معادلات جواب حقیقی یافت نگردد به مکان قبلی که برای جسم متحرک تشخیص داده شده است استناد می‌گردد. راهکارهای دیگری نیز می‌توان برای این شرایط پیشنهاد داد که بسته به محیط و سرعت جسم متحرکی که به دنبال ردگیری و مکان‌یابی آن هستیم، می‌تواند عملکرد را بهبود ببخشد.

در نهایت یادآور می‌شویم که مکان به‌دست‌آمده به ازای حل روابط فوق، در واقع مکان جسم متحرک نسبت به گیرنده ۴ که آن را مبدأ قرار دادیم به دست می‌آید. برای یافتن دقیق مکان فرستنده نسبت به مبدأ واقعی، باید موقعیت به دست‌آمده برای فرستنده را با موقعیت جغرافیایی دقیق گیرنده چهارم جمع نمود.

### ۳. معیار تخمین خطا

راه‌های گوناگونی برای بررسی عملکرد یک سیستم مکان‌یابی غیرفعال وجود دارد که دو معیار از مهم‌ترین آنها در اینجا معرفی می‌گردند [۱۱-۱۳]. اولین نمونه، معیار احتمال خطای دایروی<sup>۱</sup> و براساس معیار مونت کارلو<sup>۲</sup> می‌باشد. این معیار در واقع شعاع دایره‌ای می‌باشد که اگر پیرامون مکان واقعی یک فرستنده کشیده شود، درصدی از کل تخمین‌های زده‌شده برای آن فرستنده در یک لحظه خاص را دربرگیرد. به‌عنوان مثال، CEP 50 برابر با شعاع دایره‌ای می‌باشد که بتواند ۵۰ درصد از کل تخمین‌هایی که برای موقعیت یک گره زده شده است را دربرگیرد. بنابر این می‌توان این‌طور استنباط نمود که هر چه شعاع احتمال خطای دایروی کمتر باشد، عملکرد سیستم موقعیت‌یاب بهتر بوده است. به بیان بهتر و با نگرشی عمیق‌تر، از آنجا که می‌دانیم مساحت دایره متناسب است با مربع شعاع CEP، لذا اگر شعاع CEP نصف گردد به این معناست که عملکرد سیستم موقعیت‌یاب به نحو چشم‌گیری بهبود یافته است. هرچند، تخمین‌های زده‌شده در مورد موقعیت یک فرستنده به‌صورت متقارن در پیرامون آن قرار نمی‌گیرند، لیکن با این وجود، باز هم می‌توان معیار احتمال خطای دایروی را به‌عنوان یک معیار مناسب برای ارزیابی عملکرد سیستم موقعیت‌یاب در نظر گرفت. در

در رابطه (۱۷) مجهولات در هر دو طرف رابطه وجود دارند؛ مکان فرستنده  $x$  در سمت راست معادله و شعاع فاصله بین فرستنده تا مبدأ  $R_s$  در سمت چپ معادله. اگر شعاع فاصله فرستنده تا مبدأ دانسته شود آنگاه رابطه (۱۷) جواب یکتای زیر را برای  $x$  به دست می‌دهد.

$$x = \frac{1}{2} M^{-1} (\Delta - 2R_s d) \quad (18)$$

البته به شرط آنکه ماتریس مکان سنسورها یعنی  $M$  دارای معکوس باشد. در رابطه (۱۸) هنوز هم شعاع فاصله بین فرستنده و مبدأ نامشخص می‌باشد. برای حل این مشکل به خاطر آورید که:

$$R_s = (x^T x)^{1/2}$$

با جایگزین نمودن رابطه (۱۸) در رابطه (۱۹) و بسط آن داریم:

$$R_s^2 [4 - 4d^T (M^{-1}) d] + R_s [2d^T (M^{-1})^T M^{-1} \Delta + 2\Delta^T (M^{-1})^T M^{-1} d] - [\Delta^T (M^{-1})^T M^{-1} \Delta] = 0 \quad (19)$$

تنها متغیر این معادله، شعاع مکان فرستنده می‌باشد و بقیه متغیرها همگی شناخته‌شده‌اند. در نهایت برای معادله (۱۹) حداکثر دو جواب یافت خواهد شد:

$$R_s = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}; \quad R_s \geq 0;$$

که در این رابطه:

$$a = [4 - 4d^T (M^{-1})^T d]$$

$$b = [2d^T (M^{-1})^T M^{-1} \Delta + 2\Delta^T (M^{-1})^T M^{-1} d]$$

$$c = -[\Delta^T (M^{-1})^T M^{-1} \Delta]$$

1. Circular Error Probability (CEP)

2. Monte-Carlo

#### ۴. بهینه‌سازی مکانی

بهینه‌سازی مکانی و یا همان توپولوژی گیرنده‌های مکان‌یاب راداری TDOA یکی از مسایل مهم در این نوع از سیستم‌هاست. در ادامه، الگوریتمی که در آن با استفاده از معیار CEP سایتینگ بهینه گیرنده‌ها به‌دست می‌آید، ارائه می‌شود. الگوریتم پیشنهادی به ترتیب ذیل است:

ابتدا با فرض تعداد گیرنده‌های حداقل ۳، آنها را در فضای تعریف‌شده به‌صورت تصادفی قرار می‌دهیم. سپس برای یک خط مسیر از هدف مورد نظر، مقادیر اختلاف زمانی را با موقعیت سایت‌های به‌دست‌آمده محاسبه می‌کنیم و معیار CEP را برای هر کدام به‌دست می‌آوریم. در این مرحله از کار، CEP کلی را از رابطه زیر محاسبه می‌کنیم:

$$CEP_i = \text{MAX}(CEP_i^k) \quad (20)$$

که  $k$  مشخص‌کننده نقاط موجود در یک خط مسیر از هدف است. مقادیر  $CEP_i$  و موقعیت گیرنده‌های آن، در هر مرحله ذخیره می‌شود. این کار به تعداد مشخصی تکرار شده و در انتها آن موقعیت‌هایی از گیرنده انتخاب می‌شوند که دارای کمترین مقدار خطای CEP باشند:

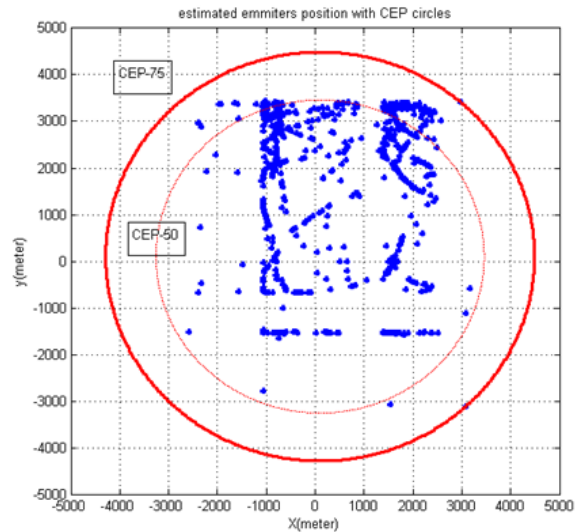
$$CEP_{opt} = \min(CEP_i) \quad (21)$$

در ادامه کار، تعداد گیرنده‌ها را یکی اضافه کرده و مراحل بالا دوباره اجرا می‌گردد و برای این مرحله نیز یک  $CEP_{i+1(opt)}$  به‌دست می‌آید. این کار را به تعداد گیرنده‌های مورد نظر ادامه داده و در انتها با استفاده از معیار به‌دست‌آمده و تعداد گیرنده‌ها به‌صورت زیر تصمیم‌گیری خواهیم نمود:

$$\text{Topology}_{OPT} \equiv \{ \min(CEP_{i_{OPT}}) \text{ for all } i \cap \text{opt}(i) \} \quad (22)$$

که منظور از  $\text{opt}(i)$ ، انتخاب تعداد گیرنده براساس پارامترهایی چون هزینه، همزمان‌سازی گیرنده‌ها و ... می‌باشد.

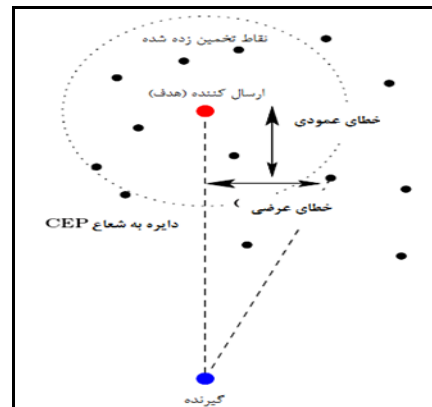
لازم به ذکر است که در این روش انتخاب توپولوژی، انتخاب موقعیت اولین گیرنده در روند الگوریتم تأثیری ندارد. به هر حال برای افزایش بازدهی این الگوریتم این پروسه را چندین بار تکرار می‌نماییم تا نقاط بهینه جهت چیدمان گیرنده حاصل گردد. همچنین در انتخاب توپولوژی بهینه، مسیر انتخابی بسیار حائز اهمیت است. از این رو در هر بار تکرار، مسیرهای متفاوتی را در



شکل ۲. موقعیت‌های تصادفی در یک خط مسیر ایجاد شده به همراه احتمال خطای دایروی

عمل، دایره‌های CEP پیرامون مکان تخمینی جسم فرستنده در نظر گرفته می‌شوند؛ زیرا مکان دقیق فرستنده در دسترس نمی‌باشد. دایره‌های CEP-50 و CEP-75 برای یک سری مکان خط مسیر متحرک با اضافه شدن خط در صفحه دوبعدی در شکل ۲ نشان داده شده است.

روش دوم برای ارزیابی عملکرد یک سیستم موقعیت‌یاب، یافتن دو مقدار است: خطای عرضی و خطای عمودی. خطای عرضی برابر است با اختلاف فاصله عرضی موجود بین مکان واقعی فرستنده و مکان تخمینی آن و خطای عمودی هم برابر است با اختلاف فاصله عمودی بین مکان اصلی فرستنده و مکان تخمینی آن به کمک اطلاعات حاصل از موقعیت‌یابی به روش غیر فعال. در شکل ۳ هر دو معیار نشان داده شده است [۱۵-۱۳].



شکل ۳. معیارهای ارزیابی عملکرد رادار غیرفعال



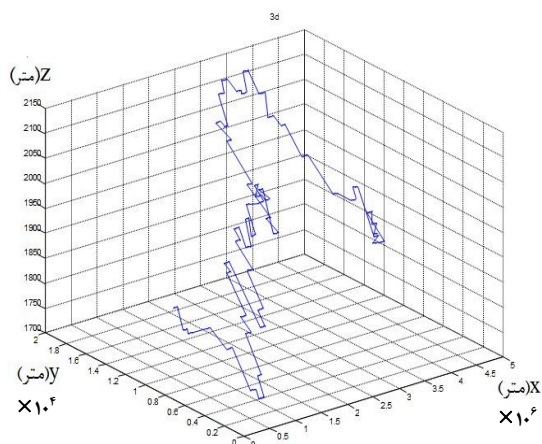
### ۵. شبیه سازی الگوریتم

در ابتدا، مسیر فرضی شبیه سازی شده برای حرکت هدف را نشان می دهیم. اطلاعات این مسیر به عنوان ورودی به برنامه وارد گردیده و ادامه شبیه سازی برای محاسبه دایره های CEP بر اساس این اطلاعات صورت می پذیرد.

همچنین برای افزایش میزان اعتبار نتایج شبیه سازی، این شبیه سازی را ۱۰۰ بار با نویزی گوسی به واریانس ۱ نانو تکرار می کنیم و در نهایت از نتایج میانگین می گیریم. همچنین بر اساس همین نتایج، بهترین مکان برای قرارگیری رادارها محاسبه می گردند. طبیعی است که بهترین مکان، مکانی است که به کوچک ترین شعاع دایره CEP منجر گردد. بر اساس آن چه که شعاع از اطمینانی مطلوب طراح سیستم باشد، می توان مکان گیرنده ها را انتخاب نمود. به عنوان نمونه، بهترین عملکرد سیستم در شرایطی که معیار CEP برای ۲۵ درصد از کل نمونه ها مطلوب باشد منجر به نمودار شکل ۶ می گردد. در این حالت، محل قرارگیری رادارها به صورت جدول ۱ می باشد.

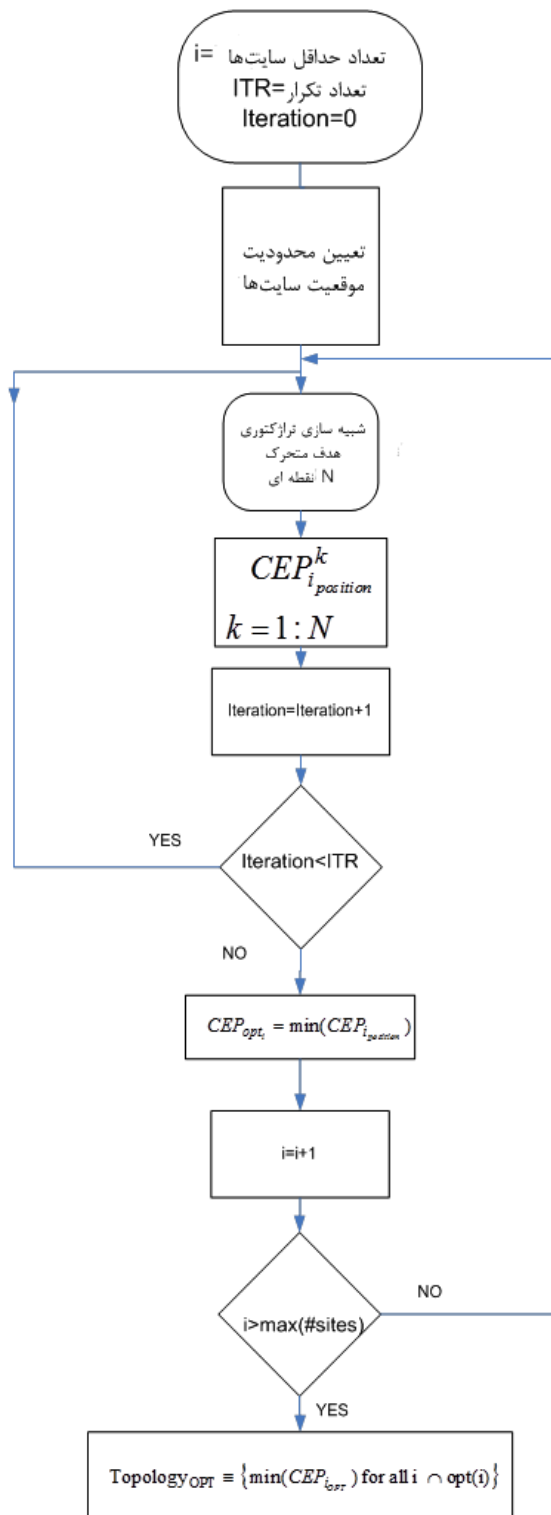
جدول ۱. الگوریتم بهینه سازی مکانی

نام گیرنده / موقعیت مکانی (× ۱۰ <sup>۶</sup> متر)	x	y	z
گیرنده ۱	۱,۵۷۰۶	۰,۰۱۸۴	۰,۰۰۰۱
گیرنده ۲	۱,۵۵۶۸	-۰,۰۱۸۱	۰,۰۰۰۹
گیرنده ۳	۱,۵۴۸۷	-۰,۰۵۲۳	۰,۰۰۰۳
گیرنده ۴	۱,۶۳۶۵	۰,۰۶۵۵	۰,۰۰۰۳

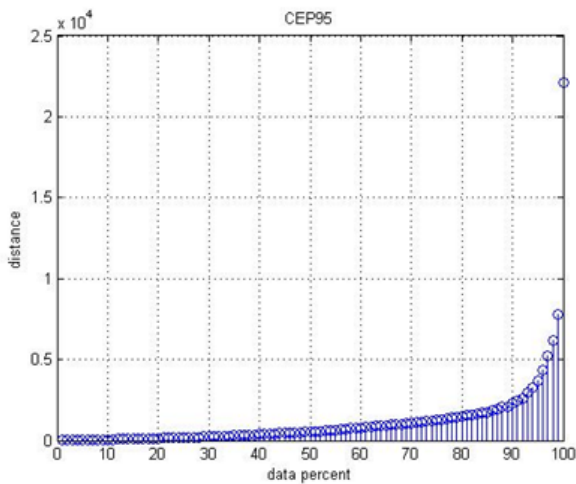


شکل ۵. مسیر فرضی حرکت هدف (محورها برحسب متر می باشند)

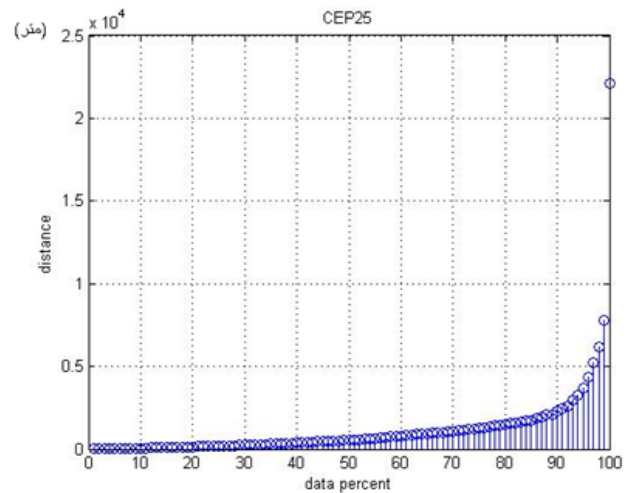
الگوریتم مورد پردازش قرار می دهیم تا جامعیت الگوریتم از بین نرود. شکل ۴، الگوریتم مطرح شده را نمایش می دهد.



شکل ۴. الگوریتم بهینه سازی مکانی



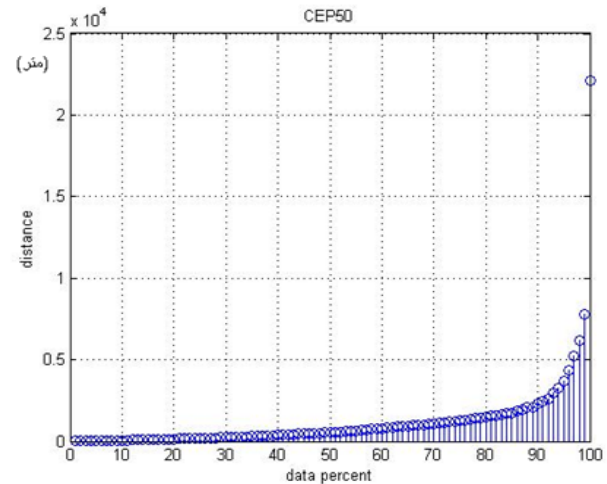
شکل ۹. دایره CEP۹۵ (محور عمودی برحسب متر می‌باشد)



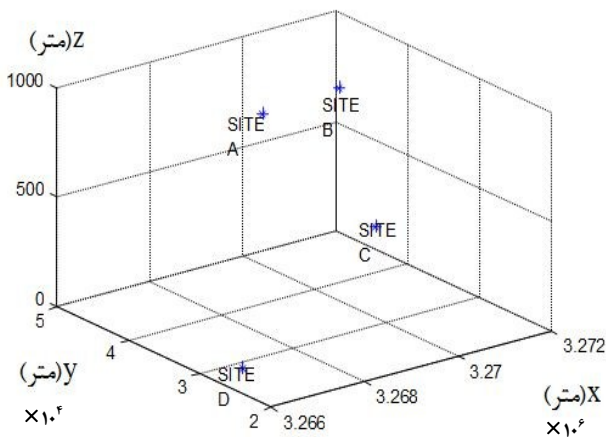
شکل ۶. دایره CEP۲۵ (محور عمودی برحسب متر می‌باشد)

به بیان دیگر، مکان‌های راداری که منجر به کمترین شعاع CEP۲۵ می‌گردند، در کل پوششی به‌صورت شکل ۶ بر روی اطلاعات واقعی خواهند داشت. این شکل، نشان‌دهنده میزان فاصله تخمین محل هدف از محل واقعی هدف می‌باشد. شعاع دایره‌های CEP۵۰، CEP۷۵ و CEP۹۵ هم به‌ترتیب در شکل‌های ۷ تا ۹ ارائه گردیده است. به بیان دیگر، این شکل‌ها، از شکل ۶ تا ۹ - نشان‌دهنده درصدی از داده‌های خروجی هستند (محورافقی) که خطای شعاعی آنها از موقعیت اصلی برابر با مقدار نشان داده شده است (محور عمودی).

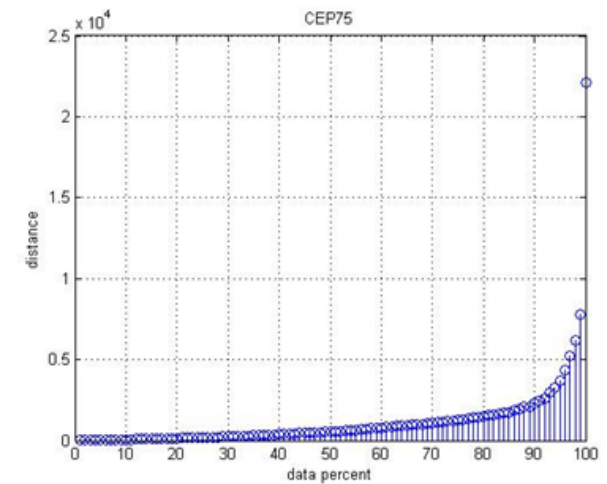
موقعیت گیرنده‌های به‌دست آمده بعد از ۱۰۰ بار تکرار الگوریتم ارائه شده به‌صورت شکل ۱۰ به‌دست آمده است. شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ موقعیت تخمین‌زده شده نهایی هدف شبیه‌سازی شده را نشان نسبت به موقعیت اصلی‌اش نشان می‌دهند. شکل ۱۲ نشان‌دهنده موقعیت تخمینی X و Y به‌دست آمده از الگوریتم معرفی شده نسبت به موقعیت



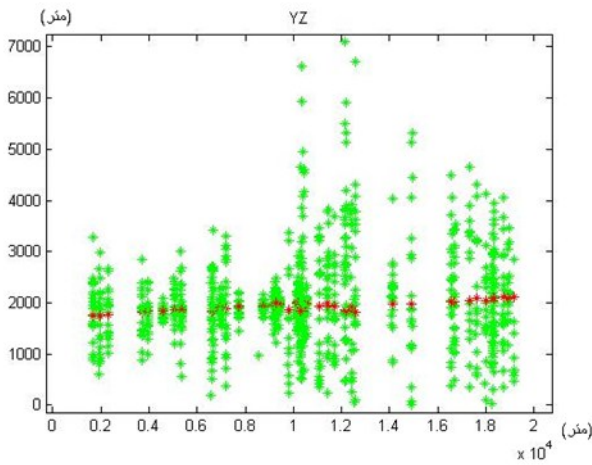
شکل ۷. دایره CEP۵۰ (محور عمودی برحسب متر می‌باشد)



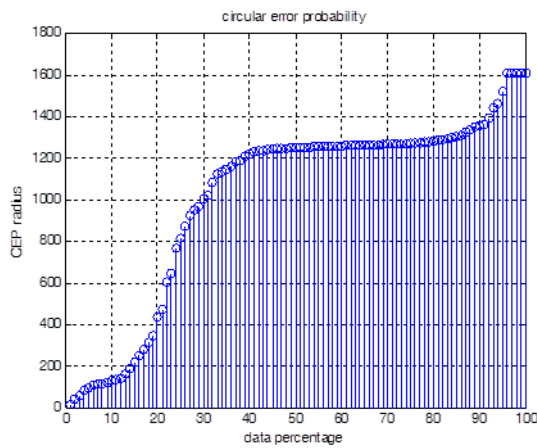
شکل ۱۰. موقعیت ۴ گیرنده بهینه بعد از اعمال الگوریتم مکانی



شکل ۸. دایره CEP۷۵ (محور عمودی برحسب متر می‌باشد)



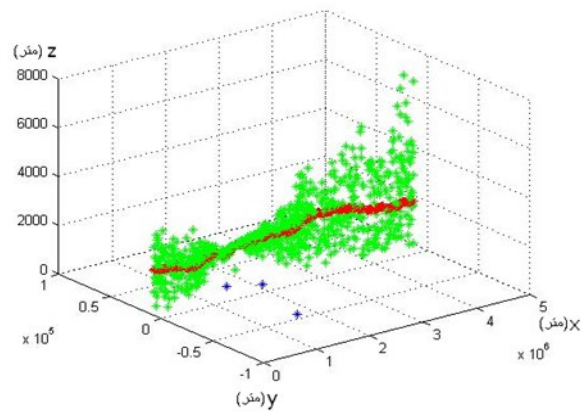
شکل ۱۴. نمایشی از عملکرد سیستم تخمین Y-Z (محورها بر حسب متر می باشند)



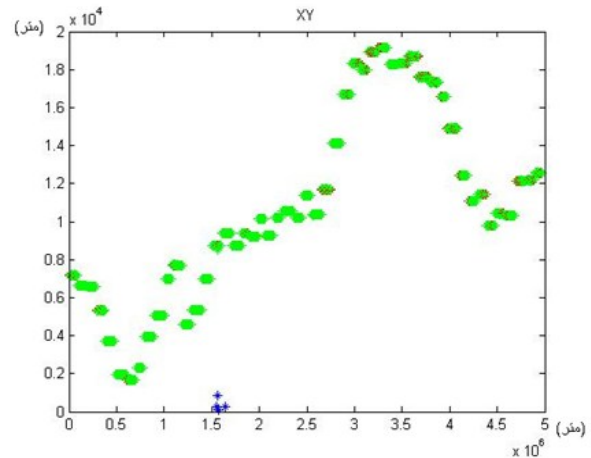
شکل ۱۵. معیار CEP به ازای درصد مختلف نقاط محاسبه شده موقعیت در مکان بهینه سازی شده

دقیق هدف متحرک می باشد. شکل های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب، موقعیت تخمینی X-Z الگوریتم معرفی شده و Y-Z (نقاط روشن تر) را به موقعیت دقیق آنها (نقاط تیره تر) نشان می دهند. همان طور که از دو شکل ۱۳ و ۱۴ مشخص می باشد، عملکرد این روش در راستای محور Z با خطا همراه می باشد.

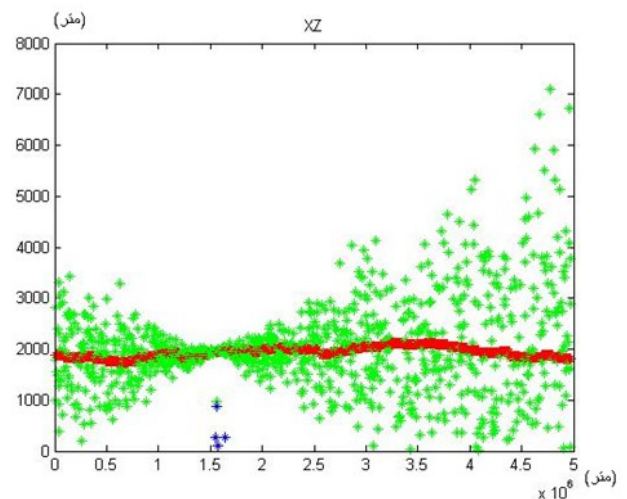
معیار CEP در شکل ۱۵ به نمایش گذاشته شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، معیار CEP در مکانی بهینه به مقدار میانگین ۸۷۰ متر در موقعیت ۱۰۰ کیلومتری فرستنده رسیده است. در مقایسه با نتایج به دست آمده با تکنیک های نوین [۱۶]، که میانگین CEP آنها در فاصله ۲۵ کیلومتری ۹۴۴ متر بوده، معیار ۸۷۰ متری در فاصله ۱۰۰ کیلومتری کاملاً مطلوب می باشد.



شکل ۱۱. نمایشی سه بعدی از عملکرد سیستم تخمین. نقاط تیره به هم پیوسته مسیر واقعی حرکت هدف، نقاط روشن تخمین مسیر حرکت هدف توسط الگوریتم و نقاط تیره جدا از هم محل رادارها را نشان می دهد (محورها بر حسب متر می باشند).



شکل ۱۲. نمایش X-Y عملکرد سیستم تخمین. نقاط تخمین بر نقاط واقعی تقریباً منطبق هستند. (محورها بر حسب متر می باشند)



شکل ۱۳. نمایشی از عملکرد سیستم تخمین X-Z

- [7] F. Evennou et al., "An experimental TDOA UWB location system for NLOS environments," 2005 IEEE 62nd Vehicular Technology Conference-Fall, Vol. 1, pp. 420-423, Sep., 2005.
- [8] C. H. Knapp and G. C. Carter, "Estimation of time delay in the presence of source or receiver motion," J. Acoust. Soc. Amer., vol. 61, no. 6, pp.1545–1549, 1977
- [9] W. H. Foy, "Position-location solution by Taylor-series estimation," IEEE Trans. Signal Processing, 2004.
- [10] K. Mizugaki et al., "Accurate Wireless Location/Communication System With 22-cm Error Using UWB-IR," Proc. 2007 IEEE Radio and Wireless Symposium, pp. 455-458, Jan. 2007.
- [11] Xiaomei Qu, "Source localization by TDOA with random sensor position errors", Information Fusion International Conference, IEEE FUSION, 2012.
- [12] D. Bechler and K. Kroschel, "Three different reliability criteria for time delay estimates," in 12th European Signal Processing Conference EUSIPCO, Wien, Austria, September 2004.
- [13] Y. Huang, J. Benesty, and J. Chen, "Speech acquisition and enhancement in a reverberant, cocktail-party-like environment," in Proc. IEEE ICASSP, 2006.
- [14] J. Scheuing and B. Yang, "Efficient synthesis of approximately consistent graphs for acoustic multi-source localization," in Proc. IEEE ICASSP, 2007.
- [15] T. Jia and R. M. Buehrer, "A New Cramer-Rao Lower Bound for TOA-based Localization", Proceedings of IEEE MilCom 2008, Nov. 2008.
- [16] Veselý, Jiri, and Petr Hubáček. "The TDOA system topology optimization from signal source position error estimation point of view." WSEAS Advances in Sensors, Signals and Materials 65-68, 2010.

## ۶. نتیجه

در این مقاله، به کمک الگوریتم مکان‌یابی TDOA پیشنهاد شده توانستیم مکان تخمینی هدف را به‌دست آوریم. سپس به کمک معیار CEP، بهینه‌ترین مکان را برای سایت‌ها انتخاب نمودیم. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که چنانچه واریانس نویز ورودی قابل کنترل باشد، در راستای  $x$ - $y$  تخمین بسیار مناسبی از مکان فرستنده حاصل خواهد شد. اما در راستای  $z$  کماکان خطا قابل توجه خواهد بود. یکی از راه‌کارهای حذف خطای  $z$  افزایش تعداد گیرنده‌ها بیش از ۴ سایت است. البته در مقابل هزینه سیستم، مسایل همزمان‌سازی، برقراری لینک بین گیرنده و... نیز افزایش می‌یابد که باید به آنها توجه نمود.

## ۷. مراجع

- [1] Koks, Don, "Numerical Calculations for Passive Geolocation", Defence Science and Technology Organisation, Edinburgh, SA, 2007.
- [2] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, and J. Liu, "Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems", IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Part C, vol. 37, No. 6, pp. 1067-1080, Nov. 2007.
- [3] Xin-liang Niu, Guo-qing Zhao, Yuan-hua Liu and Hong Chang, "High Precision Passive TDOA Location Method for Low-altitude Targets", Journal of Xidian University, vol. 36, pp. 862-866, 2009.
- [4] Schaeue, H. C., "Passive Source Localization Employing Intersecting Spherical Surfaces from Time-of-Arrival Differences", IEEE Transaction on acoustic, speech, and signal processing, Vol. ASSP-35, NO. 8, 1987.
- [5] R. A. Poisel, "Electronic warfare target location methods", Boston: Artech House, 2005, pp. 139-168.
- [6] Y. T. Chan and K. C. Ho, "A simple and efficient estimator for hyperbolic location," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 42, pp. 1905–1915, Aug. 1994.