

بهینه سازی سایتینگ و استخراج تاخیر در مکان یاب راداری

رحمان کبیری^۱، علی کرمانی^{۲*}، محمدساریجلو^۳، مصطفی اصغریپور سالکویه^۴

^۱ دانشجوی دکتری، دانشگاه امام حسین(ع) دانشکده و پژوهشکده جنگال

^۲ دانشجوی دکتری، دانشگاه علم و صنعت، دانشکده برق

^۳ کارشناسی ارشد، دانشگاه امام حسین(ع) دانشکده و پژوهشکده جنگال

^۴ دانشجوی دکتری مخابرات سیستم دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

مساله‌ی 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 مکان-یابی براساس اندازه‌گیری اختلاف زمانی^۱ اشاره نمود. این نوع مکان‌یابی که در رادارهای غیرفعال^۲ کاربرد دارد، مبتنی بر اختلاف زمانی بین دریافت سیگنال ارسال شده از طرف فرستنده در چند گیرنده مختلف می‌باشد. هدف این پژوهش پیاده‌سازی روش مزبور و انتخاب روشی بهینه جهت تخمین خطای سیستم و ارزیابی نقاط ابهام آن می‌باشد. با توجه به مستندات و قضایای ارائه شده در این نوشتار معیار احتمال خطای دایروی^۳ به عنوان معیاری برای ارزیابی کیفیت عملکرد رادارهای مبتنی بر TDOA معرفی شده و در نهایت با استفاده از این معیار سایتینگ بهینه برای دست‌یابی به کمترین خطا معرفی شده است. نتایج شبیه‌سازی عملکرد مناسب روش انتخابی این معیار را در سایتینگ و همچنین دقت مطلوب مکان‌یابی را در مورد رادارهای TDOA بهینه شده، نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی

رادارهای TDOA، مکان‌یابی به روش غیرفعال، معیار CEP.

Optimization of Site Topologies and Delay Extraction in Passive Radars

Rahman Kabiri¹, Ali Kermani^{2*}, Mohammad Sarijlu¹, Mostafa Asgharpoor²

¹Electronic Warfare Department, Imam Hosein University

²Electrical Department, Iran university of science and technology

Localization of Moving objects has attracted a lot of attention, at the present time. In this regard, several algorithms to detect and track various objects were presented. As an example, localization by measuring the time differences of arrival signals (TDOA) can be mentioned. This method used in passive radars is based on the time differences between the signal sent from the transmitter to several different receivers. The purpose of this research is to implement TDOA method and select the optimal method to estimate the system error and evaluate ambiguous of it. According to the arguments presented in this manuscript¹ 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

¹ Time Difference of Arrival

² passive

³ Circular Error Probability

۱- مقدمه

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 به طور کاملاً مستحکم نیازمندیم یا این‌که باید به کمک تکنیکی به صورت مداوم آنتن‌ها را کالیبره نماییم. مشکل دیگر این روش پیچیدگی بالای آنست [۵]. اگرچه در این زمینه استثنائاتی نظیر الگوریتم معرفی شده در مرجع [۵]^۵ نیز وجود دارد لیکن این الگوریتم‌ها عمدتاً به دلیل نیاز به اندازه‌گیری‌های دقیق، ذخیره و به کارگیری اطلاعات کالیبراسیون آرایه‌ها و نیز پیچیدگی ذاتی کالیبراسیون این آنتن‌ها، دارای پیچیدگی‌های ذاتی می‌باشند.

در روشی دیگر، این امکان وجود دارد که ایستگاه پایه به صورت غیر مستقیم زمان انتقال سیگنال از فرستنده تا گیرنده در مسیر مستقیم یا معکوس طی می‌نماید را محاسبه نماید. این تکنیک روش مکان‌یابی براساس زمان دریافتی سیگنال^۱ نامیده می‌شود [۱۴و۵]. 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 می‌گیرد. کل زمانی که از لحظه‌ی ارسال پیام از طرف فرستنده تا لحظه‌ی دریافت پاسخ آن از طرف گیرنده به طول 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 تاخیر کل مسیر رفت و برگشت دست یافت. نصف این زمان تاخیر می‌تواند برای محاسبه‌ی فاصله‌ی بین فرستنده و گیرنده مورد استفاده قرار گیرد. اگر این تاخیر به ازای سه آنتن مختلف در اختیار باشد می‌توان به کمک روش سه گوش‌سازی^۶ به مکان دقیق فرستنده دست یافت. مشکلات اساسی در این روش مشاهده می‌گردد، تاخیر 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 به شدت به وجود مسیر دید مستقیم وابسته می‌باشد.

یکی دیگر از این تکنیک‌ها، روش براساس اختلاف زمانی سیگنال‌های دریافتی^۷ است که بر مبنای تاخیرهای موجود بین دریافت سیگنال در آنتن‌ها ی 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 تاخیری که این همبستگی را حداکثر می‌سازد، میزان تاخیر بین دو سیگنال دریافتی در دو آنتن مختلف محاسبه می‌گردد. به کمک یک مقدار مشخص برای تاخیر 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 [۱]. 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

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 علیرغم کارایی بسیار خوب، محرمانگی حضور رادار به مخاطره می‌افتد. در واقع به این ترتیب، هدف متحرک نیز متوجه حضور رادار می‌گردد.

در روش مکان‌یابی به صورت 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 تکنیک‌ها روش مکان‌یابی براساس زاویه دریافتی سیگنال^۱ است. این تکنیک گاهی اوقات تکنیک جهت دریافت^۲ هم نامیده می‌شود. این روش از سیستم‌های چند آنتنی^۳ بهره می‌برد و به دنبال یافتن جهت سیگنال ارسالی می‌باشد. بنابراین اگر یک مقدار جهت سیگنال دریافتی یافت گردد، آن گاه می‌توان اینطور فرض نمود که فرستنده‌ی 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 جهات تشخیص داده شده 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 اشکالات مهمی در این روش موجود می‌باشد. برای آن که 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^۴ بین فرستنده و گیرنده وجود داشته باشد. بدون تردید چنین چیزی در محیط بی سیم خصوصی مناطق شهری که به شدت دچار اهداف سایه هستند، امکان‌پذیر نمی‌باشد. فاکتور مهم تأثیرگذار دیگر، هزینه‌ی سنگین نصب آنتن‌های آرایه‌ای می‌باشد [۲]. هرچند آنتن‌های وقفی 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 حومه‌ی 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 به طور کامل موقعیت آنها کالیبره شده باشد. در غیر این صورت، تغییرات بسیار اندک حتی به اندازه‌ی یک دقیقه در مکان آنتن‌های آرایه‌ای بر اثر حوادثی نظیر باد و طوفان، به این دلیل که این مکان‌ها به عنوان مرجع برای

⁵ ESPERIT

⁶ Time Of Arrival (TOA)

⁷ Triangulation

⁸ Time Differences of Arrival signals (TDOA)

¹ Angle Of Arrival (AOA)

² Direction Of Arrival (DOA)

³ Multi Array Antenna

⁴ Line Of Sight (LOS)

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

- ۱- تفریق مقادیر تخمین زده شده‌ی زمان دریافت^۲ از دو فرستنده‌ی پایه‌ی متفاوت به منظور بدست آوردن اختلاف زمانی نسبی.
- ۲- از طریق محاسبه‌ی 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 ست 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.

۲-۱- مدل ریاضی در محاسبه‌ی همبستگی

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

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

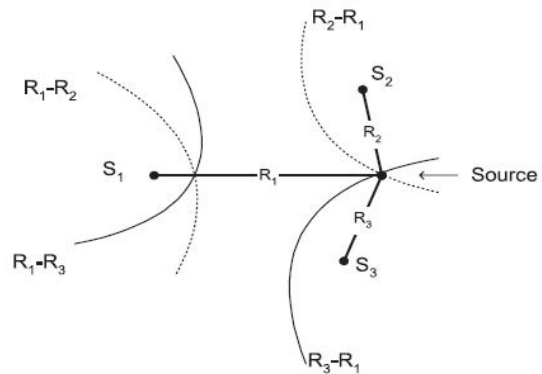
که در آن A_1 و A_2 ضرایب دامنه‌ی سیگنال، $n_1(t)$ و $n_2(t)$ نویز و تداخل، d_1 و d_2 تاخیرهای زمانی سیگنال می‌باشند. در این مدل فرض گردیده است که $S(t)$ و $n_1(t)$ و $n_2(t)$ فرایندهایی حقیقی و ایستاد با میانگین صفر می‌باشند و $S(t)$ با $n_1(t)$ و $n_2(t)$ ناهمبسته می‌باشد. با مرجع قرار دادن دامنه و تاخیر در گیرنده‌ای که زودتر از بقیه‌ی گیرنده‌ها توانسته است سیگنال را دریافت نماید، رابطه‌ی (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 گیرنده‌ی مناسب امکان‌پذیر می‌گردد. در ادامه حد همبستگی گردشی و خودبستگی به صورت زیر محاسبه می‌گردند:

$$R_{x_2 x_1}^\alpha(\tau) = AR_s^\alpha(\tau - D)e^{-j\pi\alpha D} + R_{n_2 n_1}^\alpha(\tau) \quad (3)$$

فرستنده دانست. البته تعریف هذلولی‌ها با فرض هم‌صفحه بودن گیرنده‌ها و فرستنده می‌باشد. به این روش، روش مکان‌یابی هذلولوی هم می‌گویند [۶]. این روش مزایای بسیار زیادی نسبت به سایر روش‌ها دارد. از آنجایی که تمامی محاسبات در سطح ابتدایی صورت می‌گیرد، لذا نیاز به هیچ تغییری در فرستنده نمی‌باشد. به همین دلیل این روش به مراتب نسبت به روش‌های مبتنی بر سیستم مکان‌یابی جهانی^۱ 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 هم‌زمان سازی- در شرایطی که یک منبع قدرتمند تشعشع کننده سیگنال در نزدیکی فرستنده‌ی هدف قرار می‌گیرد- هم مصونیت ایجاد می‌نماید. اگر چنین منبعی بر روی سیگنال‌های دریافتی در آنتن تاثیر گذاشته باشد، میزان این تاخیر 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 [۴].



شکل (۱): هذلولی‌های ایجاد شده به کمک روش TDOA

بخش ۲ بصورت 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.

۲- بررسی روش TDOA

در این بخش، روش TDOA معرفی گردیده و مزایای آن نسبت به سایر روش‌ها بیان می‌گردد. همچنین، بیشتر به جزئیات این روش می‌پردازیم و تکنیک‌های مختلف حل معادلات هذلولی را ارائه می‌نماییم. 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 مقادیر اختلاف زمانی به معادلات هذلولوی تبدیل گردیده و سپس به کمک روش‌هایی، جواب صحیح یافت می‌گردد.

² TOA

¹ Global Positioning System (GPS)

منحنی‌های مذکور می‌تواند مکان یک فرستنده را به طور کامل در فضا مشخص نماید. این راه حل در واقع به کمک روش‌های عددی ارائه گردیده است زیرا راه حل ساده‌ای برای یافتن پاسخ برای دستگاه‌های متشکل از معادلات سهموی چند بعدی وجود ندارد. در بسیاری از مواقع این مساله در رابطه با مکان یابی گره‌ای^۹ است که در یک صفحه‌ی دو بعدی در حال حرکت است و لذا تنها با قطع دادن دو منحنی می‌توان مکان فرستنده را تشخیص داد. از جمله‌ی این موارد می‌توان به مکان‌یابی یک گره‌ی متحرک نظیر یک گوشی موبایل در اطراف یک ایستگاه ارسال و دریافت^{۱۰} اشاره نمود. گاهی اوقات، فرستنده در موقعیتی قرار گرفته است که فاصله‌ی 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 مساله به صورت مکان تقاطع دو خط در می‌آید. اما در حالت سه بعدی مساله پیچیده تر می‌گردد.

یکی از مسائلی که در حل عددی همزمان دستگاه‌هایی که دارای معادلات چند بعدی هذلولوی هستند دارای اهمیت می‌باشد آنست که محل تقاطع این هذلولوی‌های چند بعدی به ازای اندکی تغییر در محل مرکز یکی از هذلولوی‌های چندبعدی به مقدار زیادی جابه‌جا می‌گردد. اما این مساله در مورد کره‌های متقاطع وجود ندارد. این تفاوت به این دلیل است که هذلولوی‌های چند بعدی، سطوحی را تعریف می‌نمایند که از هم به فاصله‌ی 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 مساله‌ی فوق و به خاطر داشتن پیچیدگی حل دستگاه‌های معادلات هذلولوی چند بعدی برای مکان‌یابی سه بعدی، سعی می‌گردد که این مساله به صورتی در بیاید که بتوان از کره‌ها برای حل معادلات استفاده کرد.

برای حالت ۴ سنسوری، می‌توان فاصله‌ی فرستنده تا سنسور A_m و تا سنسور B_m را به صورت d_{ij} بر اساس متغیر نامعلوم D_i که فاصله‌ی فرستنده از سنسور A_m می‌باشد بیان نمود:

$$d_{ij} = D_i - D_j \quad i, j = 1, 4 \quad (10)$$

$$d_{ij} = -d_{ji}$$

$$d_{ij} = c(t_i - t_j) = c\Delta t$$

که در روابط بالا Δt اختلاف زمانی دریافت سیگنال در گیرنده‌ها و c سرعت صوت می‌باشد.

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

$$d_{12} = d_{13} - d_{23} = d_{14} - d_{24} \quad (11)$$

$$d_{13} = d_{12} + d_{23} = d_{14} - d_{34}$$

$$d_{23} = d_{13} - d_{12} = d_{24} - d_{34}$$

$$d_{14} = d_{12} + d_{24} = d_{13} + d_{34}$$

$$d_{24} = d_{14} - d_{12} = d_{23} + d_{34}$$

$$d_{34} = d_{14} - d_{13} = d_{24} - d_{23}$$

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

(۴)

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

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

اگر $S(t)$ فرکانس گردشی α را از خود نشان دهد که با $n_1(t)$ و $n_2(t)$ مشترک نمی‌باشد، آن‌گاه با استفاده از این مقدار α در محاسبات (۳) تا (۵)، با متوسط گیری داریم:

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

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

$$R_{x_2 x_1}^{\alpha}(\tau) = AR_s^{\alpha}(\tau - D)e^{-j\pi\alpha D} \quad (7)$$

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

(۸)

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

تخمین دقیق اختلاف زمانی سیگنال‌های دریافتی به تخمین تاخیرهای زمانی که مقاومت در برابر نویز و تداخل دارند و می‌توانند مؤلفه‌های سیگنال چند مسیری را بازیابی کنند نیازمندند. تکنیک‌های متنوعی برای محاسبه‌ی مقدار D با دقت‌های متفاوت و درجات آزادی گوناگون ارائه گردیده‌اند. این روش‌ها شامل تکنیک‌های بهبودیافته‌ی همبستگی^۱ و تکنیک‌های همبستگی چرخشی^۲ می‌گردند. تکنیک‌های مبتنی بر به کارگیری خاصیت‌های پایداری ناهموار^۳ از جمله همبستگی چرخشی^۴، تنظیم همدموسی مکانی^۵، همبستگی محدود مکانی باند محدود شده^۶ و تکنیک پرونی گردشی^۷ از این دسته می‌باشند [۱۳].

۲-۲- روش حل معادلات مکان‌یابی برای سیستم‌های سه بعدی

مساله‌ی مکان‌یابی فرستنده متحرک به صورت غیرفعال^۸ و به کمک اختلاف زمانی دریافت سیگنال در گیرنده‌ها از جمله مباحث مطرح در رادار محسوب می‌گردد. در اکثر موارد، این مساله با در نظر گرفتن موقعیت‌ها به صورت دو بعدی تا حد زیادی قابل حل می‌گردد. معمول‌ترین روش برای یافتن مکان فرستنده به صورت غیرفعال، استفاده از مقادیر تاخیر زمانی بین دو گیرنده برای تعریف منحنی‌هایی که با هم اختلاف فاصله‌ی زمانی ثابتی دارند می‌باشند. 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

1 Generalized Cross Correlation (GCC)

2 Cyclic Cross Correlation (CCC)

3 Cyclostationary

4 Cyclic Cross Correlation (CYCCOR)

5 Spectral Coherence Alignment (SPECCOA)

6 Band-Limited Spectral Correlation Ratio (BL-SPECCOR)

7 Cyclic Prony

8 Passive

9 Node

10 Base Transceiver Station (BTS)

$$\begin{bmatrix} R_1^2 - d_{14}^2 \\ R_2^2 - d_{24}^2 \\ R_3^2 - d_{34}^2 \end{bmatrix} - 2(x_s^2 + y_s^2 + z_s^2)^{1/2} \begin{bmatrix} d_{14} \\ d_{24} \\ d_{34} \end{bmatrix} \quad (۱۶)$$

$$= 2 \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix}$$

در ضمن به خاطر می‌سپاریم که $R_s^2 = D_4^2$. به طور سمبولیک رابطه‌ی (۱۶) را می‌توان به فرم زیر نوشت:

$$\Delta - 2R_s d = 2MX \quad (۱۷)$$

که در آن:

$$\Delta = \begin{bmatrix} R_1^2 - d_{14}^2 \\ R_2^2 - d_{24}^2 \\ R_3^2 - d_{34}^2 \end{bmatrix}, d = \begin{bmatrix} d_{14} \\ d_{24} \\ d_{34} \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix},$$

$$M = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{bmatrix}$$

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

$$x = \frac{1}{2} M^{-1} (\Delta - 2R_s d) \quad (۱۸)$$

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

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

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

$$R_s^2 [4 - 4d^T (M^{-1})^T d] + R_s [2d^T (M^{-1})^T M^{-1} \Delta + 2\Delta^T (M^{-1})^T M^{-1} d] - [\Delta^T (M^{-1})^T M^{-1} \Delta] = 0 \quad (۱۹)$$

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

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

که در این رابطه

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

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

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

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

$$(y_i - y_s)^2 + (z_i - z_s)^2 = D_i^2 \quad i=1,4 \quad (۱۲)$$

$$D_1 = (d_{12} + d_{13} + 2d_{14} + d_{34})/4 + D_4$$

$$D_2 = (-d_{12} + d_{23} + d_{14} + 2d_{24} + d_{34})/4 + D_4$$

$$D_3 = (-d_{13} - d_{23} + d_{14} + d_{24} + 2d_{34})/4 + D_4$$

که در رابطه‌ی بالا (x_i, y_i, z_i) مکان سنسور A_m و (x_s, y_s, z_s) مکان فرستنده می‌باشد.

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

$$x_i^2 - 2x_i x_s + x_s^2 + y_i^2 - 2y_i y_s + y_s^2 + z_i^2 - 2z_i z_s + z_s^2 = (d_{i4} + D_4)^2, \quad i=1,3$$

$$x_4^2 - 2x_4 x_s + x_s^2 + y_4^2 - 2y_4 y_s + y_s^2 + z_4^2 - 2z_4 z_s + z_s^2 = D_4^2.$$

(۱۳)

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

در بعضی موارد، یک راه حل حداقل مربعات^۱ به عنوان جایگزین برای دسته‌ی معادلات (۱۰) وجود دارد.

با حل معادله چهارم از دسته معادلات رابطه‌ی (۱۳) به ازای فاصله‌ی مبدا مکانی تا محل فرستنده که آن را با R_s^2 داریم:

$$R_s^2 \equiv x_s^2 + y_s^2 + z_s^2$$

$$= -(x_4^2 + y_4^2 + z_4^2) + D_4^2 + 2x_4 x_s + 2y_4 y_s + 2z_4 z_s$$

$$= -R_4^2 + D_4^2 + 2x_4 x_s + 2y_4 y_s + 2z_4 z_s \quad (۱۴)$$

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

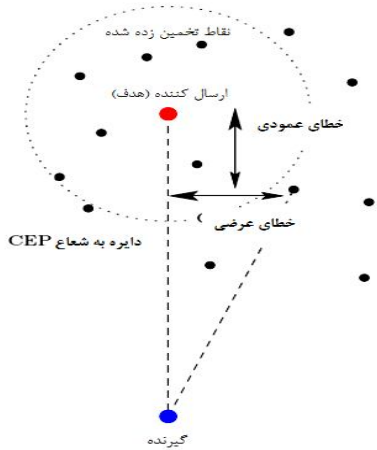
$$R_i^2 - (d_{i4} + D_4)^2 + D_4^2 - R_4^2 = 2x_i x_s + 2y_i y_s + 2z_i z_s - 2x_4 x_s - 2y_4 y_s - 2z_4 z_s, \quad i=1,3 \quad (۱۵)$$

با حفظ جامعیت کار، گیرنده‌ی چهارم را به عنوان مبدا در نظر می‌گیریم. به این ترتیب مختصات گیرنده‌ی چهارم به صورت زیر تغییر می‌یابد:

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

با اعمال فرض فوق در رابطه‌ی (۱۵) داریم:

^۱ Least Squares



شکل (۲): معیارهای ارزیابی عملکرد رادار غیرفعال

بهینه سازی سایتینگ و یا همان توپولوژی گیرنده های مکان یاب راداری TDOA یکی از مسایل مهم در این نوع از سیستم هاست. در ادامه الگوریتمی که در آن با استفاده از معیار CEP سایتینگ بهینه گیرنده ها بدست می آید، ارائه می شود. الگوریتم پیشنهادی به ترتیب ذیل است: ابتدا با فرض تعداد گیرنده های حداقل n ، آنها را در فضای تعریف شده به صورت رندوم قرار می دهیم. سپس برای یک تراژکتوری از هدف مورد نظر مقادیر اختلاف زمانی را با موقعیت سایت های بدست آمده محاسبه می کنیم و معیار CEP را برای هر کدام بدست می آوریم. در این مرحله از کار CEP کلی را از رابطه ی زیر محاسبه می کنیم:

$$CEP_i = MAX(CEP_i^k) \quad (20)$$

که k مشخص کننده ی نقاط موجود در یک تراژکتوری از هدف است. مقادیر CEP_i و موقعیت گیرنده های آن در هر مرحله ذخیره می شود. این کار به تعداد مشخصی تکرار شده و در انتها آن موقعیت هایی از گیرنده انتخاب می شوند که دارای کمترین مقدار خطای CEP باشند:

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

در ادامه ی کار، تعداد گیرنده ها را یکی اضافه کرده و مراحل بالا دوباره اجرا می گردد و برای این مرحله نیز یک $CEP_{i+1_{opt}}$ بدست می آید. این کار را به تعداد گیرنده های مورد نظر ادامه داده و در انتها با استفاده از معیار بدست آمده و تعداد گیرنده ها بصورت زیر تصمیم گیری خواهیم نمود:

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

که منظور از $opt(i)$ ، انتخاب تعداد گیرنده براساس پارامترهایی چون هزینه، همزمان سازی گیرنده ها و ... می باشد.

لازم به ذکر است که در این روش انتخاب توپولوژی، انتخاب موقعیت اولین گیرنده در روند الگوریتم تاثیری ندارد. به هر حال برای افزایش بازدهی این الگوریتم این پروسه را چندین بار تکرار می نماییم 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 الگوریتم مورد پردازش قرار می دهیم تا جامعیت الگوریتم از بین نرود.

در شرایطی که برای معادله دو جواب بدست آید، با توجه به شرایط محیطی معمولاً می توان یکی از جواب ها را صحیح دانست و جواب دیگر را حذف نمود.

در شبیه سازی های مربوط به این پروژه، زمانی که دو جواب حقیقی برای این معادلات یافت می شود، با توجه به محدوده ی ناحیه ای که مورد بررسی قرار می گیرد، تنها یکی از دو نقطه ی بدست آمده در محدوده قرار می گیرد. در شرایطی که برای معادلات جواب حقیقی یافت نگردد به مکان قبلی که برای جسم متحرک تشخیص داده شده است استناد می گردد. راهکارهای دیگری نیز می توان برای این شرایط پیشنهاد داد که بسته به محیط و سرعت جسم متحرکی که به دنبال ردگیری و مکان یابی آن هستیم، می تواند عملکرد را بهبود ببخشد.

در نهایت یادآور می شویم که مکان بدست آمده به ازای حل روابط فوق، در واقع مکان جسم متحرک نسبت به گیرنده ی ۴ که آن را مبدا قرار دادیم بدست می آید. برای یافتن دقیق مکان فرستنده نسبت به مبدا واقعی، باید موقعیت بدست آمده برای فرستنده را با موقعیت جغرافیایی دقیق گیرنده ی چهارم جمع نمود.

۳- معیار تخمین خطا و بهینه سازی سایتینگ

راه های گوناگونی برای بررسی عملکرد یک سیستم مکان یابی غیرفعال وجود دارد که دو معیار از مهم ترین آنها در اینجا معرفی می گردند [۱۰-۱۲]. اولین نمونه معیار احتمال خطای دایروی^۱ می باشد. این معیار در واقع شعاع دایره ای می باشد که اگر پیرامون مکان واقعی یک فرستنده کشیده شود درصدی از کل تخمین های زده شده برای آن فرستنده در یک لحظه ی خاص را دربرگیرد. به عنوان مثال CEP 50 برابر با شعاع دایره ای می باشد که بتواند ۵۰ درصد از کل تخمین هایی که برای موقعیت یک نود زده شده است را در برگیرد. بنا بر این می توان این طور استنباط نمود که هر چه شعاع احتمال خطای دایروی کمتر باشد، عملکرد سیستم موقعیت یاب بهتر بوده است. به بیان بهتر و با نگرشی عمیق تر، از آنجا که می دانیم مساحت دایره متناسب است با مربع شعاع CEP، لذا اگر شعاع CEP نصف گردد به این معناست که عملکرد سیستم موقعیت یاب به نحو چشم گیری بهبود یافته است. هر چند، تخمین های زده شده در مورد موقعیت یک فرستنده به صورت متقارن در پیرامون آن قرار نمی گیرند، لیکن با این وجود باز هم می توان معیار احتمال خطای دایروی را به عنوان یک معیار مناسب برای ارزیابی عملکرد سیستم موقعیت یاب در نظر گرفت. در عمل، دایره CEP پیرامون مکان تخمینی جسم فرستنده در نظر گرفته می شوند زیرا مکان دقیق فرستنده در دسترس نمی باشد.

روش دوم برای ارزیابی عملکرد یک سیستم موقعیت یاب یافتن دو مقدار است: خطای عرضی و خطای عمودی. خطای عرضی برابر است با اختلاف فاصله ی عرضی موجود بین مکان واقعی فرستنده و مکان تخمینی آن و خطای عمودی هم برابر است با اختلاف فاصله ی عمودی بین مکان اصلی فرستنده و مکان تخمینی آن به کمک اطلاعات حاصل از موقعیت یابی به روش غیر فعال. در شکل (۲) هر دو معیار نشان داده شده است [۱۱-۱۲].

^۱ Circular Error Probability (CEP)

۴- شبیه‌سازی

در ابتدا مسیر فرضی شبیه‌سازی شده برای حرکت هدف را نشان می‌دهیم. اطلاعات این مسیر به عنوان ورودی به برنامه وارد گردیده و ادامه شبیه‌سازی برای محاسبه دوایر CEP بر اساس این اطلاعات صورت می‌پذیرد.

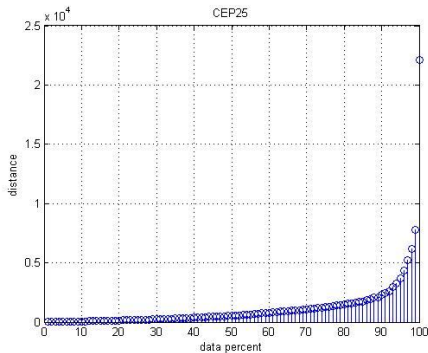
همچنین برای افزایش میزان اعتبار نتایج شبیه‌سازی، این شبیه‌سازی را ۱۰۰ بار با نویزی گوسی به واریانس ۱ نانو تکرار می‌کنیم و در نهایت از نتایج میانگین می‌گیریم. همچنین بر اساس همین نتایج، بهترین مکان برای قرارگیری رادارها محاسبه می‌گردند. طبیعی است که بهترین مکان، مکانی است که به کوچک‌ترین شعاع دایر CEP منجر گردد. بر اساس آن که چه شعاع از اطمینانی مطلوب طرح سیستم باشد، می‌توان مکان رادارها را انتخاب نمود. به عنوان نمونه بهترین عملکرد سیستم در شرایطی که معیار CEP برای ۲۵ درصد از کل نمونه‌ها مطلوب باشد منجر به نمودار شکل (۴) می‌گردد. در این حالت محل قرارگیری رادارها به صورت جدول ۱ می‌باشد.

جدول (۱): موقعیت بهینه‌ی گیرنده‌ها در یک شعاع ۱۰۰ کیلومتری

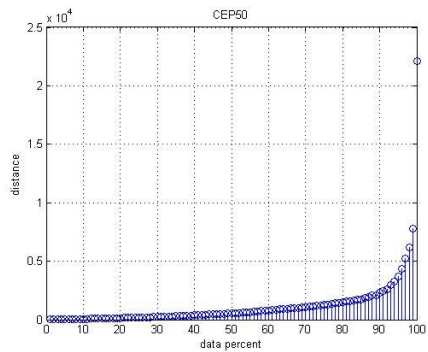
(فاصله نسبت به هدف است)

نام گیرنده / موقعیت مکانی ($\times 10^6$) 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

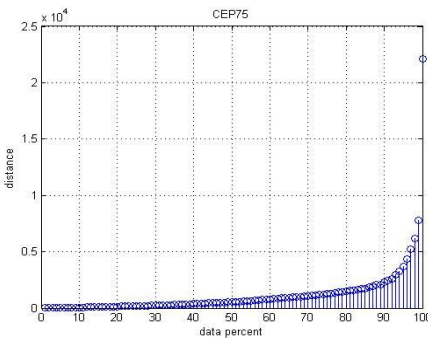
به بیان دیگر، مکان‌های راداری که منجر به کمترین شعاع CEP25 می‌گردد، در کل پوششی به صورت شکل (۴) بر روی اطلاعات واقعی خواهد داشت. این شکل، نشان دهنده میزان فاصله تخمین محل هدف از محل واقعی هدف می‌باشد. شعاع دوایر CEP50، CEP75 و CEP95 هم به ترتیب در شکل‌های ۵ تا ۷ ارائه گردیده است. به بیان دیگر این شکل‌ها، از شکل ۴ تا ۷، نشان دهنده‌ی درصدی از داده‌های خروجی هستند (محور افقی) که خطای شعاعی آن‌ها از موقعیت اصلی برابر با مقدار نشان داده شده است (محور عمودی).



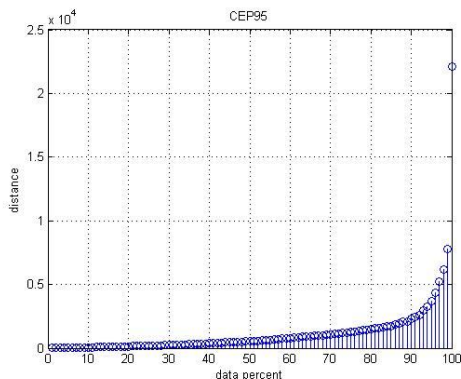
شکل (۴): دایره CEP25



شکل (۵): دایره CEP50

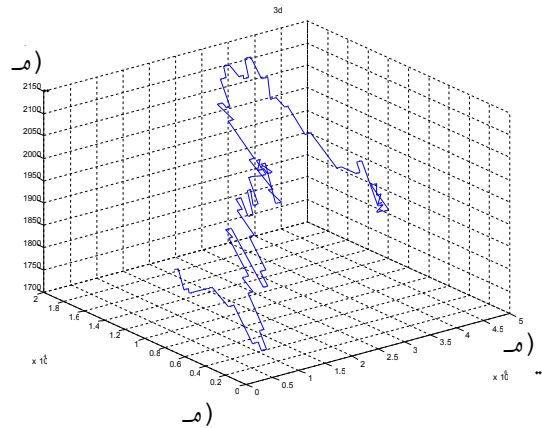


شکل (۶): دایره CEP75

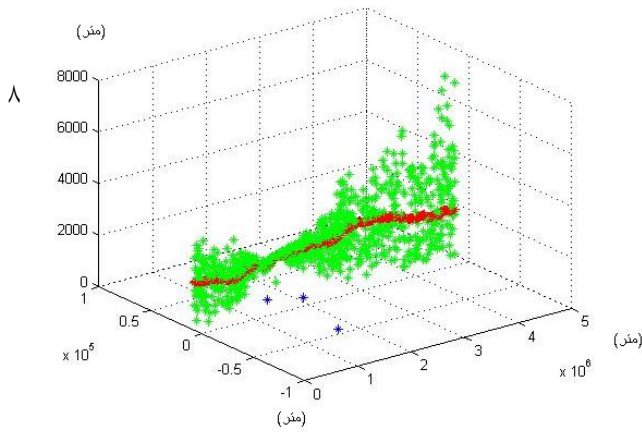


شکل (۷): دایره CEP95

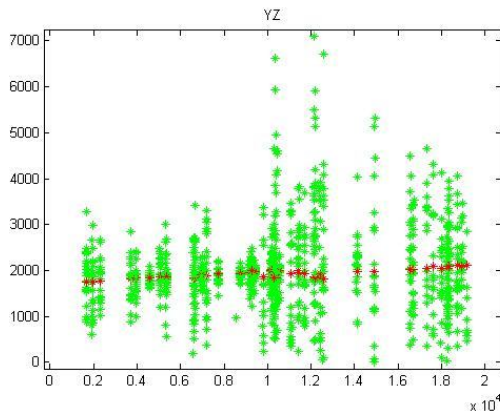
موقعیت گیرنده‌های بدست آمده بعد از ۱۰۰ بار تکرار الگوریتم ارایه شده بصورت شکل ۸ بدست آمده است. شکل‌های ۹ تا ۱۲ موقعیت تخمین زده شده‌ی نهایی هدف شبیه‌سازی شده را نشان نسبت به موقعیت اصلی اش نشان



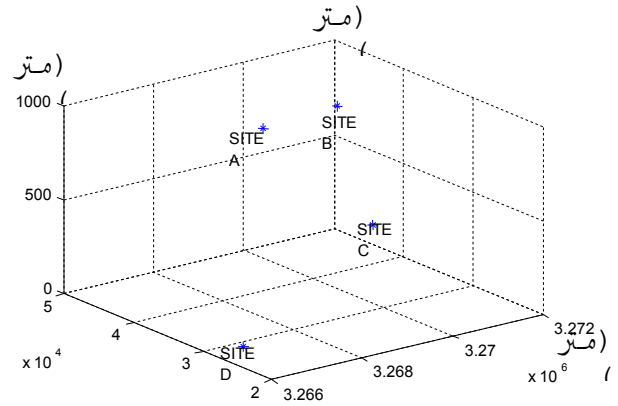
شکل (۸): مسیر فرضی حرکت هدف (محور ها بر حسب متر می‌باشند)



می‌دهند. شکل ۱۰ نشان دهنده‌ی موقعیت تخمینی X و Y بدست آمده از الگوریتم معرفی شده نسبت به موقعیت دقیق هدف متحرک می باشد. شکل ۱۱ و ۱۲ به ترتیب، موقعیت تخمینی X-Z الگوریتم معرفی شده و Y-Z (نقاط سبز رنگ) را به موقعیت دقیق آنها (نقاط قرمز رنگ) نشان می‌دهند. همان طور که از دو شکل ۱۱ و ۱۲ مشخص می‌باشد، عملکرد این روش در راستای محور Z با خطا همراه می‌باشد.

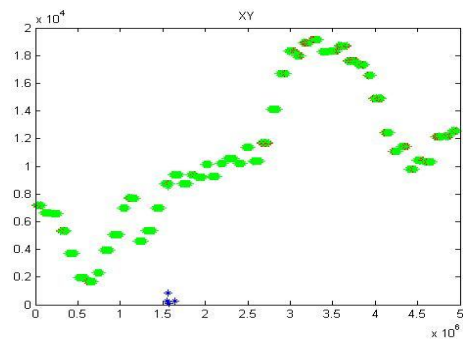


شکل (۱۲): نمایشی از عملکرد سیستم تخمین Y-Z.

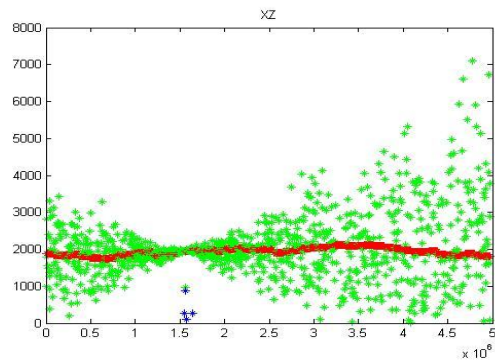


شکل (۸): موقعیت ۴ گیرنده‌ی بهینه بعد از اعمال الگوریتم سائیتینگ

شکل (۹): نمایشی سه‌بعدی از عملکرد سیستم تخمین. نقاط قرمز مسیر واقعی حرکت هدف، نقاط سبز تخمین مسیر حرکت هدف توسط الگوریتم و نقاط آبی محل رادارها را نشان می‌دهد (محورها برحسب متر می‌باشند).



شکل (۱۰): نمایش X-Y عملکرد سیستم تخمین. نقاط تخمین بر نقاط واقعی تقریباً منطبق هستند.



شکل (۱۱): نمایشی از عملکرد سیستم تخمین X-Z.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، به کمک الگوریتم مکان‌یابی TDOA پیشنهاد شده در توانستیم مکان تخمینی هدف را بدست آوریم. سپس به کمک معیار CEP، بهینه‌ترین مکان را برای سایت‌ها انتخاب نمودیم. نتایج بدست آمده 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.

مراجع

- [1] SCHAU, 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.
- [2] Koks, Don, *Numerical Calculations for Passive Geolocation*, Defence Science and Technology Organisation, Edinburgh, SA, 2007.
- [3] 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.
- [4] 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.

- [5] 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.
- [6] R. A. Poisel, "Electronic warfare target location methods", Boston: Artech House, 2005, pp. 139-168.
- [7] 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
- W. H. Foy, "Position-location solution by Taylor-series estimation," IEEE Trans. Signal Processing, 2004.
- [8] 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.
- [9] D. Bechler and K. Kroschel, "Three different reliability criteria for time delay estimates," in 12th European Signal Processing Conference EUSIPCO, Wien, Austria, September 2004.
- [10] Y. Huang, J. Benesty, and J. Chen, "Speech acquisition and enhancement in a reverberant, cocktail-party-like environment," in Proc. IEEE ICASSP, 2006.
- [11] J. Scheuing and B. Yang, "Efficient synthesis of approximately consistent graphs for acoustic multi-source localization," in Proc. IEEE ICASSP, 2007.
- [12] Xiaomei Qu, "Source localization by TDOA with random sensor position errors ", Information Fusion International Conference, IEEE FUSION, 2012.
- [13] 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.
- [14] T. Jia and R. M. Buehrer, "A New Cramer-Rao Lower Bound for TOA-based Localization", Proceedings of IEEE MilCom 2008, Nov. 2008.