

معرفی روش CTLS چند مرجعی برای مکان‌یابی غیرفعال اهداف راداری

حمید تربتی فرد^{۱*}، فرخ حجت کاشانی^۲، یاسر نوروزی^۳، محمود آتشبار^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی- تهران جنوب، ۲- استاد و ۴- دانشجوی دکتری دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- استادیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت: ۱۳۹۰/۰۵/۲۷، پذیرش: ۱۳۹۱/۰۶/۱۴)

چکیده

مکان‌یابی غیرفعال اهداف کاربرد زیادی در جنگ الکترونیک و پدافند غیرعامل دارد. روش TDOA روشی با دقت بالا در زمینه مکان‌یابی اهداف است. در روش‌های TDOA یکی از گیرنده‌ها به‌عنوان گیرنده مرجع فرض شده است و اختلاف زمانی رسیدن سیگنال به گیرنده‌های دیگر نسبت به گیرنده مرجع را اندازه‌گیری و پردازش می‌کنند. یکی از الگوریتم‌های با دقت بالای TDOA الگوریتم CTLS است که نیاز به مقداردهی اولیه مناسب دارد. در این مقاله برای کاهش خطای مکان‌یابی این الگوریتم، الگوریتم CTLS چند مرجعی پیشنهاد می‌شود. حال اگر به‌جای یک گیرنده مرجع، چندین گیرنده مرجع در نظر گرفته شود، دقت الگوریتم CTLS بیشتر می‌شود. در روش پیشنهادی مدل‌سازی براساس دو گیرنده مرجع انجام می‌گیرد. نتیجه‌های شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد در این روش در SNR های مختلف، بهبود خود را حفظ کرده است و با کمی افزایش زمان پردازش روش پیشنهادی باعث بهبود دقت الگوریتم CTLS می‌شود.

کلیدواژه‌ها: مکان‌یابی، TDOA، CTLS.

Multi Reference CTLS Method for Passive Localization of Radar Targets

H. Torbati Fard^{*}, F. Hojjat Kashani, Y. Noruzi, M. Atashbar

Islamic Azad University South Tehran Branch

(Received: 18/08/2011; Accepted: 09/04/2012)

Abstract

Passive target localization has many applications in electronic warfare and passive defense. TDOA is the most accurate method in target localization. Following this method, one of the receivers is assigned as reference receiver and time difference of arrival between other receivers and reference receiver is measured. The target location is estimated by processing of these TDOA. The CTLS is one of TDOA based algorithm that has high accuracy and needs suitable initialization. In this paper, multi reference CTLS algorithm is proposed. CTLS algorithm accuracy was improved when multi reference receiver are considered instead of one reference receiver. Simulation results show that the proposed algorithm in different SNR, keep its improvement just with little increase of time processing and better performance compared to CTLS algorithm has been obtained.

Keywords: Target Localization, TDOA, CTLS.

* Corresponding author E-mail: hamidhtf@yahoo.com

۱. مقدمه

مخابرات و... دارد. در اکثر موارد چندین گیرنده در مکان های مختلف (سایت های مکان یابی) در معرض سیگنال های ارسالی از هدف و یا سیگنال های منعکس شده از هدف قرار می گیرند و با پردازش سیگنال های دریافتی، مکان هدف تخمین زده می شود. از لحاظ نوع سیگنال های رسیده به گیرنده ها می توان مکان یابی را به دو دسته فعال^۲ و غیر فعال^۳ تقسیم بندی کرد.

در مکان یابی اکتیو، گیرنده ها، اطلاعات نسبتاً دقیقی در مورد مشخصات سیگنال ها (از قبیل زمان ارسال سیگنال، فرکانس و...) دارند و با استفاده از این اطلاعات مکان هدف تخمین زده می شود. در مکان یابی غیر فعال فرض می شود اطلاعات دقیقی از سیگنال هدف نداریم و تنها با استفاده از تفاوت های سیگنال رسیده از هدف به گیرنده های موجود در مکان های مختلف، مکان هدف تخمین زده می شود.

روش های مختلفی برای مکان یابی غیر فعال وجود دارد، از جمله این روش ها می توان به روش توان سیگنال دریافتی در گیرنده ها (روش RSS^۴)، اختلاف زمان رسیدن سیگنال به گیرنده ها (روش TDOA^۵)، زاویه ورود سیگنال به گیرنده ها (روش AOA^۶)، اختلاف فرکانس داپلر سیگنال رسیده به گیرنده ها (روش FDOA^۷) و... اشاره کرد.

در روش TDOA با مرجع قرار دادن یکی از گیرنده ها، اختلاف زمانی رسیدن سیگنال به دیگر گیرنده ها نسبت به گیرنده مرجع را محاسبه و با پردازش این تأخیرها، مکان هدف تخمین زده می شود. اولین شرط برای محاسبه دقیق تأخیرهای فوق، سنکرون بودن گیرنده ها است. با فرض برآورده شدن این شرط، می توان با استفاده از روش همبستگی متقابل (روش CC) روی سیگنال رسیده به گیرنده های مختلف، تأخیرها را تخمین زد [۱ و ۲].

مرحله بعد مکان یابی هدف از روی تأخیرهای استخراج شده در مرحله قبلی است. برای این کار الگوریتم های متنوعی پیشنهاد شده است که هر کدام مزایا و معایب خاصی دارند. یکی از این الگوریتم ها، الگوریتم LS است [۳ و ۴] که در آن با انجام عملیات ریاضی روی معادله های مربوط به مکان هدف و تأخیرها، رابطه خطی به صورت $Ax=b$ به دست می آورند و رابطه فوق را با استفاده از روش LS حل می کنند. روش دیگر استفاده از LS وزن دار شده است که به WLS شهرت دارد [۴]. در این روش ضرایب وزنی LS از روی ماتریس کواریانس نویز به دست می آید. بنابراین در این روش به دانستن ماتریس کواریانس نویز نیاز است. با توجه به اینکه ماتریس A به دست آمده مستقل از مجهولات x نیست، می توان وابستگی فوق را به صورت قید وارد مسئله کرد. بر این اساس الگوریتم LCLS تابع اصلی و قید را از روش لاگرانژ حل کرده است [۵]. الگوریتم فوق، زیر بهینه است و دقت کمتری دارد. Chan از دو WLS برای بهبود

آنچه که در پدافند غیرعامل بیشتر مورد توجه است، سیستم های غیر فعال هستند تا بتوانند مسائل مربوط به خود حفاظتی را رعایت کنند و از دید و تیر دشمن محفوظ بمانند. در سال های اخیر سیستم هایی موسوم به ELINT کار شناسایی غیر فعال سیگنال های راداری را به عهده گرفته اند و این سیستم ها خود را در برابر حملات مخابراتی و جرم های دشمن حفظ می کنند.

ELINT^۱ به معنای جمع آوری اطلاعات توسط سنسورهای الکترونیکی است. تمرکز اولیه آن بر روی جمع آوری اطلاعات از سیگنال های الکترونیکی غیر مخابراتی است. به عبارتی ELINT نتیجه مشاهده سیگنال های ارسال شده به طور عمد توسط رادارهای موجود در محیط و سیگنال های مشابه دیگر برای کسب اطلاعاتی در مورد قابلیت های آنهاست. شناسایی سیگنال از طریق آنالیز پارامترهای جمع آوری شده از یک سیگنال خاص و با مقایسه شرایط از پیش طبقه بندی شده و یا ذخیره آن به عنوان یک سیگنال قابل ارسال جدید صورت می گیرد. دریافت سیگنال های رادار به علت توان به طور نسبی بالای آنها، به طور معمول کار دشواری نیست زیرا تضعیف در گیرنده ELINT با معکوس توان دوم فاصله نسبت مستقیم دارد، در حالی که گیرنده رادار با عکس توان چهارم فاصله نسبت مستقیم دارد؛ ولی با این وجود گیرنده ELINT همواره با مشکل SNR کم مواجه است و باید به تجهیزات کم نویز مجهز باشد. در طبقه بندی، اطلاعات به دست آمده توسط ELINT در لایه های بالا قرار می گیرد. اطلاعات جمع آوری شده به طور عمد مربوط به الکترونیک شبکه دفاعی رقیب و به ویژه مواردی مانند رادار، سیستم های موشکی زمین به هوا، هواپیما و غیره است. ELINT می تواند برای پیدا کردن و شناسایی هواپیماها و کشتی ها از روی سیگنال رادار آنها یا سایر سیگنال های الکترومغناطیسی منتشر شده توسط آنها به کار رود. ارزش این عمل در شناسایی خطرهای تهدید کننده موجود در محیط مانند رادارهایی است که موشک یا هواپیما را به سمت هدف مورد نظر راهنمایی می کنند، است. اطلاعات ELINT می تواند از طریق ایستگاه های زمینی نزدیک به محل فرستنده های رقیب، کشتی های نزدیک به سواحل که تجهیزات آنها در آن مستقر است، هواپیما و یا ماهواره جمع آوری شود.

خروجی سیستم های ELINT اطلاعات استراتژیکی است که مشخصات رادارهای موجود در منطقه را برای ما به تفکیک بیان می کند. سیستم ELINT می تواند برای مکان یابی غیر فعال استفاده شود. چرا که با دانستن باند کاری فرکانس رادار و نیز سایر مشخصات از قبیل پهنای پالس، PRF، مدولاسیون و پلاریزاسیون ارسالی، می توان در سایت های گیرندگی، هدف مورد نظر را به طور دقیق جدا کرده و با محاسبات لازم بر روی سیگنال دریافتی در گیرنده، مکان آن را پیدا کرد.

مکان یابی اهداف کاربردهای زیادی در جنگ الکترونیک، سیستم های

² Active

³ Passive

⁴ Received Signal Strength

⁵ Time Differential of Arrival

⁶ Angle of Arrival

⁷ Frequency Differential of Arrival

¹ Electronic Intelligence

می‌آید. به خاطر اینکه کار با اختلاف فاصله‌ها راحت‌تر است، در ادامه به جای تأخیرها از اختلاف فاصله‌ها به صورت زیر استفاده می‌کنیم:

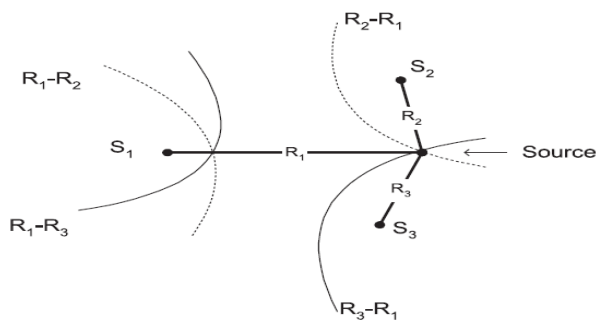
$$r_{i1} = c\tau_{i1} = \sqrt{(x_i - x_1)^2 + (y_i - y_1)^2} - \sqrt{(x_i - x_1)^2 + (y_i - y_1)^2} \quad (3)$$

در عمل در محاسبه تأخیرها، مقداری خطا وجود خواهد داشت که به خطای اندازه‌گیری معروف است. با وارد کردن خطای اندازه‌گیری، رابطه (۳) به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\hat{r}_{i1} = c\hat{\tau}_{i1} = \sqrt{(x_i - x_1)^2 + (y_i - y_1)^2} - \sqrt{(x_i - x_1)^2 + (y_i - y_1)^2 + n_{i1}} \quad (4)$$

$i = 2, 3, \dots, N$

مشاهده می‌شود که در رابطه (۴) تنها متغیرهای x_t و y_t مجهول هستند. در حقیقت مجموعه از $N-1$ معادله و ۲ مجهول داریم. الگوریتم‌های مختلفی که برای TDOA پیشنهاد شده‌اند، هر یک به شیوه‌ای خاص معادله‌های غیر خطی فوق را حل می‌کنند [۹-۱۴]. از لحاظ شماتیکی مکان هندسی مکان هدف طوری که در هر یک از معادله‌های رابطه (۴) صدق کند، به صورت یک هذلولی است. با قطع دادن $N-1$ هذلولی می‌توان مکان هدف را تخمین زد (شکل ۱).



شکل ۱. یافتن مکان فرستنده با استفاده از معادلات هذلولی

۳. الگوریتم CTLS

بعد از شرح نحوه مدل‌سازی مسئله TDOA، در این بخش روش CTLS را مرور می‌کنیم [۹]. در این روش ابتدا با استفاده از عملیات ریاضی معادله‌های (۴) به صورت خطی در می‌آید. با استفاده از معادله‌های (۴ و ۲) می‌توان نوشت:

$$r_{i1} + r_1 = r_i \quad (5)$$

با توان دو رساندن دو طرف معادله (۵) و ساده‌سازی رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} & (x_i - x_1)(x_i - x_1) + \\ & (y_i - y_1)(y_i - y_1) + r_{i1}r_1 \quad (6) \\ & = \frac{1}{2} \left((x_i - x_1)^2 + (y_i - y_1)^2 + r_{i1}^2 \right) \end{aligned}$$

رابطه فوق را می‌توان به فرم خطی زیر نوشت:

$$A\theta = b \quad (7)$$

الگوریتم استفاده کرد که منجر به دو جواب شد که تنها یکی از آنها درست است [۶]. در این روش برای انتخاب جواب صحیح به اطلاعات اولیه در مورد مکان هدف نیاز است. مزایای الگوریتم LCLS و chan منجر به الگوریتم جدید موسوم به CWLS شد [۷ و ۴]. اما هر دو الگوریتم فوق احتیاج به مقدار اولیه دارد که به طور معمول هم در اختیار نیست.

در الگوریتم TLS معادلاتی با فرض خطا در A و b حل می‌شود [۸]. با فرض همبستگی نویز موجود در A و b با هم‌دیگر، الگوریتم LS جامع قیددار (CTLS) ارائه شده است [۹]. این الگوریتم نیز نیاز به مقداردهی اولیه دارد که از روی LS به دست می‌آید. این الگوریتم نسبت به دیگر الگوریتم‌ها دقت تخمین بالایی دارد.

در این مقاله به منظور بهبود الگوریتم CTLS، الگوریتم چند مرجعی را پیشنهاد می‌کنیم که در آن مقدار اولیه الگوریتم CTLS با دقت بیشتری محاسبه می‌شود. در الگوریتم پیشنهادی به جای اینکه تنها یکی از گیرنده‌ها را به عنوان گیرنده مرجع انتخاب کنیم، تعداد بیشتری از آنها را به عنوان گیرنده مرجع انتخاب و معادلات مربوط به این حالت را با استفاده از روش LS حل می‌کنیم. مقداردهی اولیه الگوریتم CTLS با روش LS چند مرجعی به جای مقداردهی اولیه با LS تک مرجعی منجر به افزایش دقت روش CTLS می‌شود.

در ادامه در بخش ۲ مدل‌سازی روش TDOA توضیح داده‌ایم و در بخش ۳ الگوریتم CTLS را مرور می‌کنیم. در بخش ۴ الگوریتم پیشنهادی CTLS چند مرجعی را معرفی کردیم، در بخش ۵ نتیجه‌های شبیه‌سازی‌های انجام شده و ارزیابی آن بیان می‌شود و در بخش ۶ نتیجه‌گیری انجام می‌شود.

۲. مدل‌سازی روش TDOA

فرض کنیم مختصات محل هدف به صورت $p = [x_t \quad y_t]^T$ و مختصات محل گیرنده‌ها به صورت $r_i = [x_i \quad y_i]^T$ ، $i = 1, 2, \dots, N$ باشد که N تعداد گیرنده‌ها است. در این صورت تأخیر رسیدن سیگنال از هدف به گیرنده i ام (τ_i) با فاصله بین مکان هدف و مکان گیرنده فوق به صورت زیر رابطه دارد:

$$\tau_i = \frac{\sqrt{(x_i - x_t)^2 + (y_i - y_t)^2}}{c} \quad (1)$$

که c سرعت انتشار موج است. در TDOA از تأخیر زمانی رسیدن سیگنال هدف به گیرنده‌ها نسبت به گیرنده مرجع برای مکان‌یابی استفاده می‌شود [۱۰]. اگر گیرنده شماره یک را به عنوان گیرنده مرجع انتخاب کنیم، تأخیرهای مربوط به TDOA به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\tau_{i1} = \tau_i - \tau_1 = \frac{\sqrt{(x_i - x_t)^2 + (y_i - y_t)^2}}{c} - \frac{\sqrt{(x_1 - x_t)^2 + (y_1 - y_t)^2}}{c} \quad (2)$$

با ضرب تأخیرها در سرعت انتشار موج، اختلاف فاصله‌ها به دست

$\vartheta = [x_s - x_1 \quad y_s - y_1]^T$ می توان نوشت:

$$r_i = \sqrt{(x_1 - x_i)^2 + (y_1 - y_i)^2} = (\vartheta^T \vartheta)^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

با جایگذاری این رابطه در رابطه قبلی، تابع هزینه نهایی به صورت زیر در می آید:

$$F(\vartheta) = \left(A_2 \vartheta + A_3 (\vartheta^T \vartheta)^{\frac{1}{2}} - b \right)^T (GG^T)^{-1} \left(A_2 \vartheta + A_3 (\vartheta^T \vartheta)^{\frac{1}{2}} - b \right) = F(\vartheta) \quad (19)$$

که $[A_2 \quad A_3] = A$. بدین معنی که A_2 زیر ماتریس حاوی دو ستون اول ماتریس A و A_3 زیر ماتریس حاوی ستون سوم ماتریس A است.

در روش CTLS تابع هزینه $F(\vartheta)$ با استفاده از روش نیوتن حل شده است که یک روش تکراری برای حل معادله ها است. در این روش تکرارها به صورت زیر انجام می گیرد:

$$\vartheta = \vartheta_0 - \Psi^{-1} a \quad (20)$$

که:

$$\alpha = \frac{\delta F}{\delta \vartheta} \Big|_{\vartheta = \vartheta_0} \quad (21)$$

$$\Psi = \frac{\partial^2 F}{\partial \vartheta \partial \vartheta^T} \Big|_{\vartheta = \vartheta_0} \quad (22)$$

۴. الگوریتم پیشنهادی CTLS چند مرجعی

اگر به جای یک گیرنده مرجع، چندین گیرنده مرجع در نظر بگیریم دقت الگوریتم CTLS بیشتر می شود. در CTLS مکان نهایی هدف با استفاده از الگوریتم نیوتن به دست می آید. این الگوریتم نیاز به مقاداردهی اولیه مناسب دارد. در صورت مقاداردهی اولیه نامناسب ممکن است الگوریتم به مقدار کمینه اصلی مسئله همگرا نشود. در این صورت خطای الگوریتم خیلی زیاد خواهد بود. در این مقاله با مدل سازی مسئله به صورت چند مرجعی، دقت مقاداردهی اولیه روش نیوتن CTLS را بهبود می دهیم.

فرض کنیم تعداد گیرنده ها $M+R$ باشد که M تعداد گیرنده های غیر مرجع و R تعداد گیرنده های مرجع است. در الگوریتم های موجود $R=1$ فرض کردیم و به طور مثال در بخش قبلی گیرنده اول را به عنوان گیرنده مرجع برای محاسبه اختلاف های زمانی استفاده کردیم؛ ولی ما در اینجا $R=2$ فرض کردیم و دو گیرنده را به عنوان مرجع انتخاب می کنیم، این انتخاب دلخواه است. به عنوان مثال گیرنده های اول و N ام را به عنوان مرجع تصمیم گیری انتخاب می کنیم. در این حالت یک بار اختلاف های فاصله سایت های ۴، ۳، ۲ را از گیرنده اول محاسبه و بار دیگر این اختلاف فاصله ها را از گیرنده N ام محاسبه می کنیم.

با عملیات ریاضی رابطه (۶) به صورت زیر بازنویسی می شود.

$$r_{i1}^2 + 2r_1 r_{i1} = x_i^2 - x_1^2 - 2x_s(x_i - x_1) + y_i^2 - y_1^2 - 2y_s(y_i - y_1) \quad (23)$$

$$i = 2, 3, \dots, N-1$$

$$A = \begin{pmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & r_{21} \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & r_{31} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N - x_1 & y_N - y_1 & r_{N1} \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\theta = \begin{pmatrix} x_i - x_1 \\ y_i - y_1 \\ r_i \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$b = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 - r_{21}^2 \\ (x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2 - r_{31}^2 \\ \vdots \\ (x_N - x_1)^2 + (y_N - y_1)^2 - r_{N1}^2 \end{pmatrix} \quad (10)$$

در مدل فوق اطلاعات مکان هدف در بردار θ قرار دارد و بردار b و ماتریس A را می توان از روی اطلاعات مکان گیرنده ها و اختلاف فاصله اندازه گیری شده محاسبه کرد.

در روش LS با فرض مستقل بودن r_1 از مکان هدف، هم چنین صرف نظر از خطای r_{i1} های مورد استفاده در A ، رابطه (۷) را با کمینه سازی LS حل می کنند و بردار θ و در نتیجه مکان هدف را به صورت زیر تخمین می زنند:

$$\hat{\theta}_{LS} = \arg \min_{\theta} (A \hat{\theta} - b)^T (A \hat{\theta} - b) = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (11)$$

در روش CTLS از وابستگی r_1 به مکان هدف و هم چنین خطای r_{i1} های مورد استفاده در A صرف نظر نکرده و مسئله در حالت کلی حل می شود.

با اعمال مقادیر واقعی و نویزدار اندازه گیری ها در A و b می توان $\Delta A = A_0 + \Delta A$ و $b = b_0 + \Delta b$ در نظر گرفت. A_0 و b_0 مقادیر بدون خطا و ΔA و Δb به صورت زیر تعریف می شود:

$$\Delta A = [0 \quad 0 \quad G_1 n], \Delta b = G_2 n \quad (12)$$

به نحوی که $G_2 = -\text{diag}$ و $G_1 = I_{M-1}$ و $n = [n_{21}, n_{31}, \dots, n_{M1}]^T$

است. حال با این فرض می توان نوشت:

$$A_0 \theta = b_0 \quad (13)$$

$$A \theta - b = \Delta A \theta - \Delta b = r_1 G_1 n - G_2 n = G n \quad (14)$$

بر این اساس حل مسئله به حل معادله شرطی زیر منجر می شود:

$$\min_{\theta, n} \|n\|^2 \quad (15)$$

به شرط $A \theta - b = G n$

از روی شرط می توان بردار n را با LS حل کرد که به صورت زیر در می آید:

$$n = G^+ (A \theta - b) \quad (16)$$

$$G^+ = G^T (GG^T)^{-1}$$

که با جایگذاری در تابع هزینه اصلی، تابع هزینه کلی روش CTLS به صورت زیر تبدیل می شود:

$$F(\theta) = (G^+ (A \theta - b))^T (G^+ (A \theta - b)) = (A \theta - b)^T (GG^T)^{-1} (A \theta - b) \quad (17)$$

برای اعمال وابستگی r_1 به مکان هدف، با تعریف

رابطه (۲۳) را می توان به صورت زیر نوشت:

$$r_i r_i - (x_m - x_1) x_s - (y_m - y_1) y_s = w_{i1} \quad (24)$$

$$i = 2, 3, \dots, N-1$$

که

$$w_{i1} = \frac{1}{2} (r_i^2 - x_i^2 + x_0^2 - y_i^2 + y_0^2) \quad (25)$$

فرم ماتریسی رابطه فوق به صورت زیر است:

$$\begin{bmatrix} x_1 - x_2 & y_1 - y_2 & d_{21} \\ x_1 - x_3 & y_1 - y_3 & d_{31} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_1 - x_{N-1} & y_1 - y_{N-1} & d_{(N-1)1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ r_1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$= \begin{bmatrix} w_{21} \\ w_{31} \\ \vdots \\ w_{(N-1)1} \end{bmatrix}$$

حال در این فرم هر گیرنده غیر از گیرنده اول را می توان به عنوان مرجع انتخاب کرد. با در نظر گرفتن گیرنده N به عنوان گیرنده مرجع، رابطه (۲۷) به فرم زیر در می آید:

$$\begin{bmatrix} x_N - x_2 & y_N - y_2 & d_{2N} \\ x_N - x_3 & y_N - y_3 & d_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N - x_{N-1} & y_N - y_{N-1} & d_{(N-1)N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ r_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{2N} \\ w_{3N} \\ \vdots \\ w_{(N-1)N} \end{bmatrix} \quad (27)$$

با ترکیب رابطه های (۲۶) و (۲۷) به رابطه کلی زیر می رسیم که در آن به جای یک مرجع از دو مرجع استفاده شده است:

$$H p = w \quad (28)$$

که

$$H = \begin{bmatrix} x_1 - x_2 & y_1 - y_2 & d_{21} & 0 \\ x_1 - x_3 & y_1 - y_3 & d_{31} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_1 - x_{M-1} & y_1 - y_1 & d_{(M-1)1} & 0 \\ x_M - x_2 & y_M - y_2 & 0 & d_{2M} \\ x_M - x_3 & y_M - y_3 & 0 & d_{3M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_M - x_{M-1} & y_M - y_{M-1} & 0 & d_{(M-1)M} \end{bmatrix} \quad (29)$$

که در این حالت تعمیم یافته w و p برابر است با:

$$w = \begin{bmatrix} w_{21} \\ w_{31} \\ \vdots \\ w_{(M-1)1} \\ w_{2M} \\ w_{3M} \\ \vdots \\ w_{(M-1)M} \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$p = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ r_1 \\ r_M \end{bmatrix} \quad (31)$$

با حل LS رابطه (۲۸) می توان به رابطه زیر رسید:

$$p = H^+ w \quad (32)$$

که

$$H^+ = (H^T H)^{-1} H^T \quad (33)$$

بنابراین در الگوریتم پیشنهادی با استفاده از مکان به دست آمده از رابطه (۳۲)، مقادری اولیه θ در الگوریتم CTLS انجام می گیرد. این کار منجر به افزایش حجم محاسبات روش CTLS دو مرجعی نسبت به CTLS تک مرجعی می شود.

۵. شبیه سازی و ارزیابی

در این بخش برای مقایسه الگوریتم پیشنهادی یا الگوریتم CLTL نتیجه های شبیه سازی های انجام شده را می گوئیم. در شبیه سازی ها از ۵ گیرنده موجود در مکان های $[0, 0; 15, 0; 0, 15; -15, 0; 0, -15]$ بر حسب کیلومتر استفاده می کنیم. هدف در مکان $(10, 90)$ کیلومتر قرار گرفته است. فرض می کنیم تأخیرها با مقداری خطا اندازه گیری شده باشد. برای اعمال خطای اندازه گیری تأخیرها، از نویز گوسی با واریانس های مختلف استفاده می کنیم. واریانس خطای اندازه گیری تأخیرها را مقادیر ۲۰۰، ۱۵۰، ۱۰۰، ۶۰، ۳۰ و ۱۰ نانو ثانیه در نظر می گیریم. به ازای هر یک از این واریانس ها، ۱۰۰۰۰ بار نویز گوسی تولید کرده و RMS خطای نتیجه های مکان یابی الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم CTLS برای ۱۰۰۰۰ آزمایش را به عنوان معیار مقایسه دو الگوریتم در نظر می گیریم. شبیه سازی ها در دو بخش مقایسه دقت تخمین مکان هدف و مقایسه زمان پردازش الگوریتم ارائه می شود.

۵-۱. مقایسه دقت تخمین مکان هدف

در اولین آزمایش نتیجه های مکان یابی سه الگوریتم CTLS تک مرجعی، LS و CTLS دو مرجعی با مقدار CRLB را با همدیگر مقایسه می کنیم. در این آزمایش مقدار خطای زمانی در محدوده ۵۰ تا ۷۰ نانو ثانیه در نظر گرفته شده است. نتیجه های این آزمایش در شکل (۲) نشان داده شده است. مشاهده می شود که الگوریتم پیشنهادی نسبت LS خطای خیلی کمتری دارد و نسبت به CTLS تک مرجعی مقدار کمی بهبود یافته است.

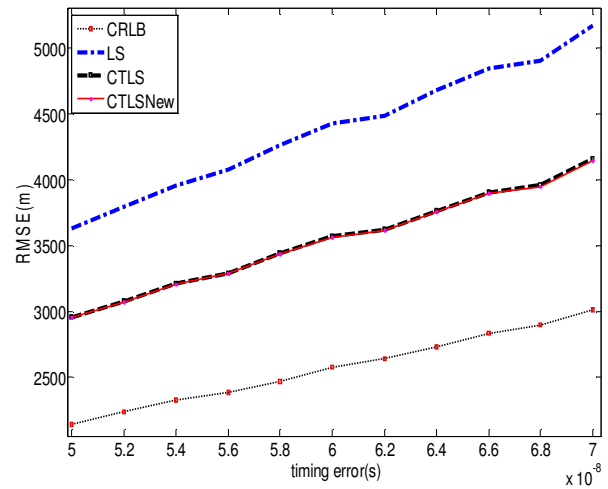
در شکل (۳) نتیجه های مکان یابی الگوریتم ها برای مقدار خطای زمانی ۱۱۰ تا ۱۲۰ نانو ثانیه مقایسه شده است. مشاهده می شود که باز هم الگوریتم پیشنهادی CTLS دو مرجعی نسبت LS خطای خیلی کمتری دارد و نسبت به CTLS تک مرجعی مقدار کمی بهبود یافته است. برای اینکه مقدار اختلاف دو الگوریتم CTLS تک مرجعی و CTLS دو مرجعی را بهتر مشاهده کنیم، حالت زوم شده شکل (۳) در نمودار شکل (۴) نشان داده شده است.

در شکل (۵) نتیجه‌های مکان‌یابی دو الگوریتم CTLS تک مرجعی و CTLS دو مرجعی با همدیگر مقایسه شده است. در این آزمایش مقدار خطای زمانی بین ۱۰۰ و ۱۱۰ نانو ثانیه انتخاب شده است. نتیجه‌های شکل فوق نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی CTLS دو مرجعی نسبت به CTLS تک مرجعی مقدار خطای مکان‌یابی کمتری دارد.

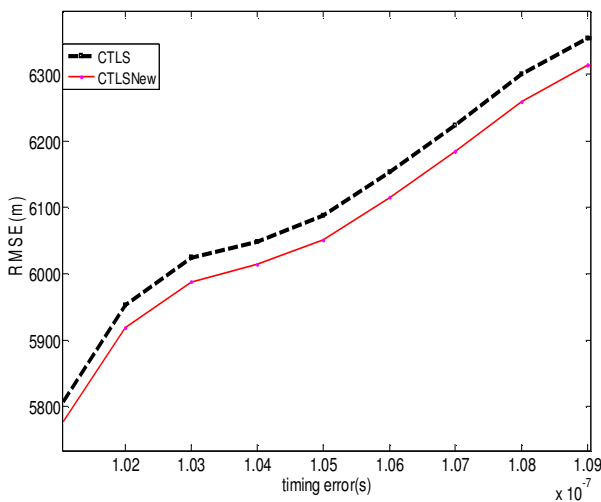
۲-۵. مقایسه زمان پردازش

در شکل (۶) روش‌های مورد اشاره از لحاظ زمان پردازش الگوریتم‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این مقایسه در MATLAB 2009a و در یک رایانه با مشخصات CPU Core 2 Duo 2.5GHz و Ram 4GB انجام شده است. مقایسه روش‌ها را برای ۱۰۰۰۰ بار تکرار انجام داده و نتیجه‌های حاصله در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۶) ملاحظه می‌کنید تفاوت الگوریتم CTLS نسبت به LS زیاد است، اما در CTLS دو مرجعی با اینکه میزان خطا کاهش یافته است، مدت زمان پردازش ۰/۱۱ برابر افزایش یافته است که مقداری بسیار کوچک برای اهداف مورد نظر ماست.

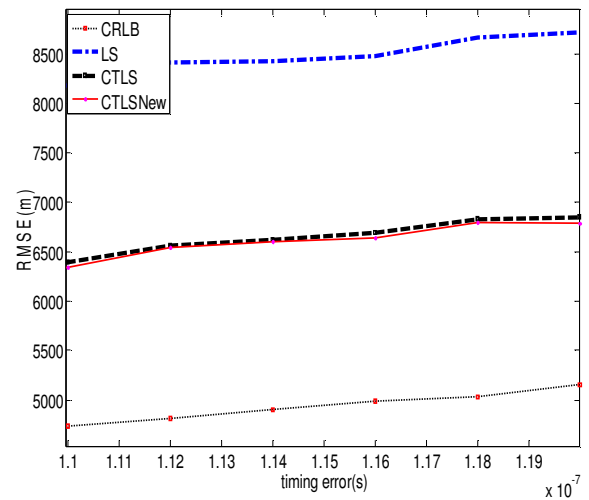
مشاهده می‌کنیم که به ازای خطاهای مختلف اندازه‌گیری زمانی، الگوریتم پیشنهادی CTLS دو مرجعی نسبت به الگوریتم CTLS تک مرجعی خطای مکان‌یابی کمتری دارد.



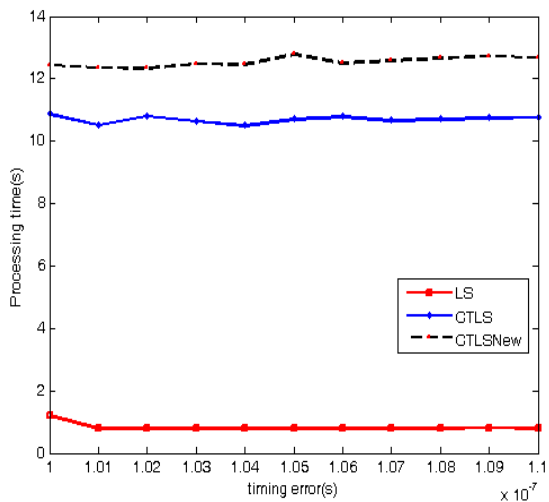
شکل ۲. مقایسه الگوریتم‌ها برای خطای زمانی ۵۰ تا ۷۰ نانوثانیه



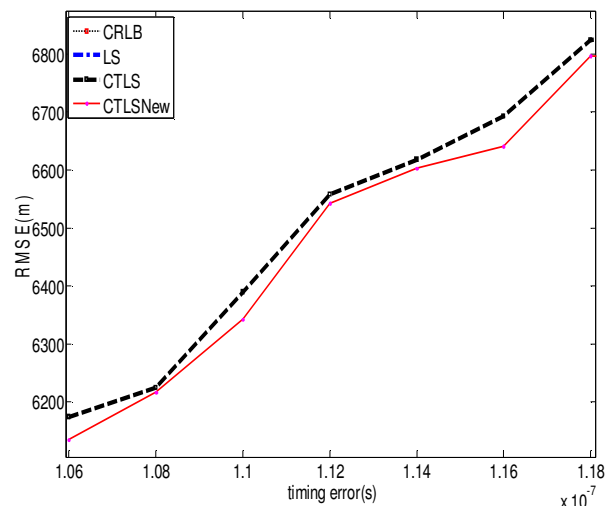
شکل ۵. مقایسه الگوریتم‌ها برای خطای ۱۰۰ تا ۱۱۰ نانوثانیه



شکل ۳. مقایسه الگوریتم‌ها برای خطای ۱۱۰ تا ۱۲۰ نانوثانیه



شکل ۶. مقایسه زمان پردازش در ۳ الگوریتم مختلف



شکل ۴. حالت زوم شده شکل (۳)

۶. نتیجه گیری

در این مقاله الگوریتم جدیدی را برای مکان‌یابی هدف پیشنهاد کردیم. در الگوریتم پیشنهادی با استفاده از LS دو مرجعی، مقاداردهی اولیه با دقت بالا تولید شد و در الگوریتم CTLS که خود از الگوریتم‌های بسیار دقیق بود، بهبود ایجاد کردیم. نتیجه‌های شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان داد که روش پیشنهادی باعث بهبود دقت الگوریتم CTLS می‌شود.

۷. مراجع

- [6] Chan, Y. T.; Ho, K. C. "A Simple and Efficient Estimator for Hyperbolic Location"; IEEE Trans. Signal Process 1994, 42, 1905–1915.
- [7] So, H. C.; Hui, S. P. "Constrained Location Algorithm Using TDOA Measurements"; IEICE Trans. Fundamentals 2003, 86, 3291–3293.
- [8] Markovsky, I.; Huffel, S. V. "Overview of Total Least-Squares Methods"; Signal Process 2007, 87, 2283–2302.
- [9] Yang, K.; Jianping, H. "Constrained Total Least-Squares Location Algorithm Using Time-Difference-of-Arrival Measurements"; IEEE Trans. on Vehicular Tech., 2010, 59, 562–1558.
- [10] Poisel, R. A. "Electronic Warfare Target Location Methods"; Boston, Artech House, 2005.
- [11] Abel, J. S.; Smith, J. O. "The Spherical Interpolation Method for Closed-Form Passive Source Localization Using Range Difference Measurements"; Proc. ICASSP-87, Dallas, TX, 471–474.
- [12] Chan, Y. T.; Ho, K. C. "A Simple and Efficient Estimator for Hyperbolic Location"; IEEE Trans. on Signal Processing, 1994, 1905–1915.
- [13] FOY, W. H. "Position-Location Solutions by Taylor-Series Estimation"; IEEE Tran. Aerospace Electron. Sys. 1976, 12, 187–194.
- [14] Abatzoglou, T. J.; Mendel, J. M.; Harada, G. A. "The Constrained Total Least Squares Technique and its Applications to Harmonic Super Resolution"; IEEE Trans. Signal Process 1991, 39, 1070–1087.
- [1] Hahn, W. R.; Tretter, S. A. "Optimum Processing for Delay-Vector Estimation in Passive Signal Arrays"; IEEE Trans. Inf. Theory 1973, 19, 608–614.
- [2] Knapp, C. H.; Carter, G. C. "The Generalized Correlation Method for Estimation of Time Delay"; IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Process 1976, 24, 320–327.
- [3] Smith, J. O.; Abel, J. S. "Closed-Form Least-Squares Source Location Estimation from Range-Difference Measurements"; IEEE Trans Acoust Speech, Signal Process 1987, 35, 1661–1669.
- [4] Cheung, K. W.; So, H. C.; Ma, W. K.; Chan, Y. T. "A Constrained Least Squares Approach to Mobile Positioning: Algorithms and Optimality"; EURASIP J. Appl. Signal Process 2006, 1–23.
- [5] Huang, Y.; Benesty, J.; Elko, G. W.; Mersereau, R. M. "Real-Time Passive Source Localization: a Practical Linear-Correction Least-Squares Approach"; IEEE Trans. Speech Audio Process 2001, 9, 943–956.