

## روشی جدید برای کمینه‌سازی اثر نویز اندازه‌گیری تاخیر بین سایت‌ها در مکان‌یابی مبتنی بر اختلاف زمان دریافت سیگنال‌ها

سید وهاب شجاع‌الدینی<sup>۱\*</sup>، رحمان کبیری<sup>۲</sup>، علی کرمانی<sup>۳</sup>، مهدی فریدونی<sup>۴</sup>

۱- استادیار پژوهشکده مهندسی برق و فناوری اطلاعات، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران ۲- دانشجوی دکتری، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

۳- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران ۴- کارشناس ارشد دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت: ۹۳/۱۲/۱۸، پذیرش: ۹۴/۰۹/۲۸)

### چکیده

در این مقاله، روشی جدید به منظور کمینه‌سازی اثر مخرب نویز اندازه‌گیری زمان تاخیر بین سایت‌ها در دقت مکان‌یابی اهداف ارائه می‌شود. بدین منظور معادلات مکان‌یابی با اعمال خطای اندازه‌گیری بازنویسی و یک تابع هزینه برحسب مکان سایت‌ها، اختلاف زمانی دریافت سیگنال‌ها و خطای مزبور معرفی می‌شود. با بهینه‌سازی این تابع، تخمینی از مقدار خطای اندازه‌گیری به دست آمده و با اعمال آن به زمان‌های تاخیر اندازه‌گیری شده، اصلاح قابل ملاحظه‌ای در تعیین موقعیت اهداف حاصل می‌گردد. به منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی کارایی آن طی دو سناریوی الهام‌گرفته از شرایط واقعی، آزموده می‌شود. در سناریوی اول، خطای اندازه‌گیری یکی از سایت‌ها در نظر گرفته شده و در سناریوی دوم خطا در همه سایت‌ها منظور می‌گردد. نتایج حاصل از مکان‌یابی به کمک روش پیشنهادی در هر دو سناریو، حاکی از برتری دقت آن به میزان حداقل ۱۱۰۰ متر نسبت به روش فاقد جبران‌سازی می‌باشد.

### واژگان کلیدی

مکان‌یابی، اختلاف زمان دریافت در سایت‌ها، نویز اندازه‌گیری، تخمین خطا، تابع هزینه

#### ۱. مقدمه

دریافت<sup>۳</sup> می‌باشد. در این روش اختلاف زمانی دریافت سیگنال ارسال شده از یک هدف که TDOA نامیده می‌شود بین گیرنده‌هایی مستقر در مکان‌های مختلف، محاسبه شده و با استفاده از اختلاف‌های زمانی مزبور، مکان هدف مشخص می‌شود. به دلیل این که در این روش اختلاف بین زمان‌های دریافت، محاسبه می‌شود، نیازی به اطلاع از زمان شروع ارسال سیگنال نیست. ابتدا سیگنال ارسال از هدف توسط چند گیرنده با مکان‌های مشخص دریافت شده و اختلاف زمان دریافت سیگنال بین هر گیرنده و یک گیرنده مشخص که مرجع نامیده می‌شود با استفاده از محاسبه همبستگی متقاطع<sup>۴</sup> بین دو سیگنال فوق، استخراج می‌شود. سرانجام با حل کردن یک دستگاه معادلات غیرخطی که در آن مکان گیرنده‌ها و مقادیر TDOA معلوم و مکان هدف مجهول می‌باشد، تعیین موقعیت هدف انجام می‌پذیرد [۶]. دستگاه معادلات غیرخطی فوق لزوماً به جواب یکتایی منجر نمی‌شود و همچنین نسبت به خطای

تعیین مکان منابع منتشرکننده امواج از روی موج ارسالی آن‌ها دارای سابقه و کاربردهای متعددی در عرصه‌های نظامی [۱] و غیرنظامی [۲] می‌باشد. بدین منظور روش‌های مختلفی تاکنون پیشنهاد شده‌اند، که از جمله آن‌ها می‌توان به اندازه‌گیری زاویه دریافت تشعشعات دریافتی<sup>۱</sup> از هدف در چند نقطه و تقاطع خطوط زاویه [۳] و استفاده از زمان دریافت تشعشعات<sup>۲</sup> هدف [۴] اشاره نمود. اگر چه هر یک از روش‌های فوق توانسته‌اند در مواردی برای مکان‌یابی اهداف سودمند باشند؛ لیکن با محدودیت‌هایی نظیر پیچیدگی تجهیزات، عدم تامین دقت مناسب در محاسبه مکان و نیاز به داشتن زمان شروع ارسال سیگنال از هدف مواجه می‌باشند [۵]. یکی از متداول‌ترین روش‌های مکان‌یابی استفاده از اختلاف زمان

\* رایانامه نویسنده پاسخگو: shojadini@irost.ir

<sup>1</sup> Angle Of Arrival

<sup>2</sup> Time Of Arrival

<sup>3</sup> Time Difference Of Arrival

<sup>4</sup> Cross Correlation

ساختار مقاله به صورت زیر است. در بخش ۲، مساله مکان یابی و تخمین بهینه نویز تشریح و مدل ریاضی پیشنهادی ارائه می گردد. در بخش ۳، عملکرد روش پیشنهادی با استفاده از شبیه سازی اهداف در دو سناریوی مختلف مبتنی بر شرایط واقعی آزموده شده و سپس نتایج حاصل از شبیه سازی مورد بررسی قرار می گیرد. در بخش ۴، عملکرد روش پیشنهادی با روش پایه بلادی که نویز را در نظر نگرفته است، مقایسه شده و مقایسه های کمی به منظور تبیین بهبود ایجاد شده توسط روش این مقاله، تشریح می گردد. بخش پایانی مقاله به نتیجه گیری اختصاص دارد.

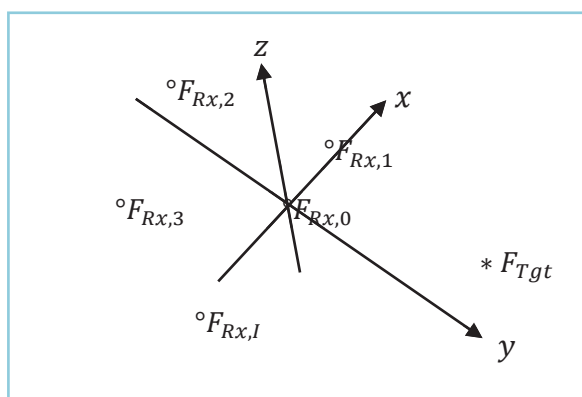
## ۲. تشریح روش پیشنهادی

در ابتدای کار با فرض ایده آل بودن مقادیر اندازه گیری شده اختلاف زمانی مساله را پیش می بریم. در این راستا هدفی را در موقعیت:

$$F_{Tgt} = [x_{Tgt} \quad y_{Tgt} \quad z_{Tgt}]^T \quad (1)$$

در نظر می گیریم. همچنین مکان قرارگیری گیرنده  $i$  ام به صورت رابطه (۲) در نظر گرفته می شود.

$$F_{Rx,i} = [x_{Rx,i} \quad y_{Rx,i} \quad z_{Rx,i}]^T \quad (2)$$



شکل ۱. شمایی از نحوه قرارگیری فرستنده و گیرنده ها

بر اساس آنچه در شکل ۱ ملاحظه می شود، تاخیر زمان دریافت سیگنال ناشی از فرستنده موقعیت  $F_{Tgt}$  در گیرنده  $i$  ام که در موقعیت  $F_{Rx,i}$  واقع شده، نسبت به زمان دریافت همین سیگنال در گیرنده مرجع (گیرنده صفر) برابر است با:

$$\tau_i = \frac{\|F_{Tgt} - F_{Rx,i}\|}{c} - \frac{\|F_{Tgt} - F_{Rx,0}\|}{c} \quad (3)$$

در رابطه فوق  $c$  سرعت انتشار موج در محیط است.  $\| \cdot \|$  بیانگر عملگر نرم دوم است یعنی:

$$\|F_{Tgt} - F_{Rx,i}\| = \sqrt{(x_{Tgt} - x_{Rx,i})^2 + (y_{Tgt} - y_{Rx,i})^2 + (z_{Tgt} - z_{Rx,i})^2} \quad (4)$$

موجود در TDOA بسیار حساس است. بر این اساس حتی نویزهای از مرتبه نانو ثانیه در حصول TDOA که به دلیل مسایل سخت افزار اندازه گیری، اجتناب ناپذیر هستند در عمل خطاهای شدیدی در موقعیت تخمینی از هدف را موجب می شوند. بدین ترتیب ارائه روش حل برای دستگاه فوق با میزان حساسیت کمینه نسبت به نویز موجود در TDOA، همواره از چالش هایی بوده که محققین این حوزه با آن رو به رو بوده اند و بدین منظور روش های مختلفی ارائه شده است. در برخی از تحقیقات از روش هایی مانند روش تکرار ساده یا نقطه ثابت، روش نیوتن و روش تندترین شیب یا روش گرادیان<sup>۱</sup> برای حل معادلات استفاده شده است. روش های فوق با معضلات مهمی نظیر نیاز به انجام محاسبات زیاد برای حصول ماتریس ژاکوبین، همگرایی کند و وجود خطای قابل توجه در نتایج رو به رو هستند [۷]. در دسته مهمی از تحقیقات با استفاده از روش های تحلیل و تقریب ریاضیاتی، دستگاه معادلات مرجع به معادلات ساده تری (مانند معادلات خطی یا مرتبه دوم ساده) تقریب زده می شود. روش موسوم به تقاطع صفحه ای [۸] و همچنین روش مبتنی بر درون یابی کروی بدین منظور معرفی شده اند [۹] که گرچه حجم محاسبات کمتری نسبت به روش های قبلی را از خود نشان می دهند ولی به شدت به TDOA حساس می باشند که این محدودیت عملاً کاربرد روش های فوق را در محیط های واقعی محدود می نماید.

یکی از متداول ترین راه های حل معادلات مکانی توسط بلادی و همکاران ارائه گردیده است [۱۰]. در این شیوه، برد هدف با استفاده از معادله درجه دوم تقریب زده می شود. سادگی معادله درجه دوم مربوط به این روش، موجب شده است که روش اخیر کاربرد قابل توجهی در مکان یابی داشته باشد. با این حال میزان حساسیت این روش نسبت به نویز با روش های قبلی تفاوت چندانی ندارد که این موضوع باعث شده که این روش صرفاً در شرایط اندازه گیری کم نویز قابل استفاده باشد.

یکی از دلایل حساسیت شدید روش بلادی نسبت به نویز می تواند آن باشد که در معادلات این روش پارامتر نویز اندازه گیری شده بین سایت های دریافت در نظر گرفته نشده است. در این مقاله تلاش می شود معادلات مکان یابی با در نظر گرفتن نویز جمع شده در اختلاف زمانی بین سایت ها بازنویسی شوند. بدین ترتیب معادله نهایی تقریب زده شده شامل مولفه های خطای اندازه گیری نیز خواهد بود. در نهایت معادله نهایی به گونه ای بهینه سازی می گردد که اثر نویز در آن به حداقل برسد و بدین ترتیب روش پیشنهادی می تواند با اصلاح معادلات فوق عملکرد آن ها را نسبت به نویز اندازه گیری سایت ها مقاوم نماید.

<sup>1</sup> Steepest decent

در این رابطه  $v_i$  نویز اندازه‌گیری طول تاخیر در سایت  $i$  ام و مرجع می‌باشد. چگالی احتمال این خطا گوسی با میانگین صفر، واریانس  $\sigma_i^2$  و ناهمبسته با نویز سایر گیرنده‌ها می‌باشد. با اعمال این اصلاح پارامتر طول تاخیر سایت‌ها به صورت رابطه (۱۵) اصلاح می‌گردد:

$$\hat{D} = D + V \quad (15)$$

از این به بعد پارامتر با علامت  $\hat{\ }^{\wedge}$  بروری متغیر به معنای معادل حالت نویزی یا به عبارت بهتر معادل اصلاح‌شده با نویز آن پارامتر خواهد بود. با اعمال مقادیر رابطه (۱۵)، رابطه (۷) بدین صورت اصلاح می‌گردد:

$$SF_{Tgt} = Z - \hat{D}R_{Tgt} \quad (16)$$

برای موقعیت‌یابی لازم است که معادله (۱۶) حل شود. پس از حل معادله، تخمین زیر را برای بردار موقعیت داریم:

$$\hat{F}_{Tgt} = (S^T S)^{-1} S^T Z - (S^T S)^{-1} S^T \hat{D}R_{Tgt} \quad (17)$$

برای ساده‌سازی در روابط، در گام اول سه سایت گیرنده که سایت مرکزی نیز در مبدا مختصات قرار دارد، فرض می‌شود و لذا پارامتر بردار طول تاخیر بدین شکل قابل ساده‌سازی است:

$$D = [d_1 \ d_2]^T \quad (18)$$

همچنین با فرض وجود خطا تنها در یکی از مقادیر اختلاف زمانی پیش می‌رویم. بنابراین بازنویسی رابطه (۱۶) داریم:

$$V = [v_1 \ v_2]^T = [v_1 \ 0]^T \quad (19)$$

لذا رابطه (۱۵) به صورت رابطه (۲۰) تبدیل می‌گردد:

$$\hat{D} = D + [v_1 \ 0]^T \quad (20)$$

و برای مرتب‌سازی رابطه (۱۷) ماتریس‌های  $Q, R$  بدین صورت تعریف می‌شوند:

$$P = (S^T S)^{-1} S^T Z \quad (21)$$

$$\hat{Q} = (S^T S)^{-1} S^T \hat{D} \\ = (S^T S)^{-1} S^T D + (S^T S)^{-1} S^T [v_1 \ 0]^T \quad (22)$$

که با توجه به این که ما فعلا سه سایت را در نظر گرفته‌ایم و معادلاتی را بر این اساس نوشته‌ایم، دو ماتریس اخیر مطابق رابطه (۲۳) بیان می‌شوند:

$$P = [p_1 \ p_2]^T \text{ و } \hat{Q} = [\hat{q}_1 \ \hat{q}_2]^T \quad (23)$$

با تعریف:

$$\gamma = (S^T S)^{-1} S^T \quad (24)$$

رابطه (۲۲) به صورت رابطه (۲۵) بازنویسی می‌شود:

معادله (۳) به صورت برداری بازنویسی می‌شود:

$$T = [\tau_1 \ \tau_2 \ \dots \ \tau_i \ \dots \ \tau_I]^T \quad (5)$$

که  $T$  بردار تاخیر و  $D$  نیز بردار تاخیر فاصله است که طبق رابطه (۶) تعریف می‌گردد.

$$D = cT \quad (6)$$

با بسط تیلور دستگاه معادلات غیر خطی (۴) و تقریب آن آن تا مشتق مرتبه اول، معادله (۷) حاصل می‌شود:

$$S = Z - DR_{Tgt} \quad (7)$$

که در آن  $S$  به صورت زیر می‌باشد:

$$S = [F_{Rx,1} \ F_{Rx,2} \ \dots \ F_{Rx,i} \ \dots \ F_{Rx,I}]^T \quad (8)$$

$F_{Rx,i}$  موقعیت سایت  $i$  ام است و تعداد سایت‌ها  $I + 1$  می‌باشد. بر این اساس  $Z$  را می‌توان از رابطه (۹) حاصل نمود:

$$Z = D_{Rx} - D \quad (9)$$

که در آن  $D_{Rx}$  طبق رابطه زیر تعریف می‌شود

$$D_{Rx} = \left[ \begin{array}{cccc} |F_{Rx,1}|^2 & |F_{Rx,2}|^2 & \dots & |F_{Rx,i}|^2 & \dots & |F_{Rx,I}|^2 \end{array} \right]^T \quad (10)$$

پارامتر  $R_{Tgt}$  فاصله هدف از سایت مرکزی، یا همان فاصله از مبدا مختصات طبق رابطه (۱۱) تعریف می‌شود:

$$R_{Tgt} = \|F\| \quad (11)$$

در روش ارائه‌شده توسط بلادی موقعیت هدف  $F_{Tgt}$  با رابطه (۱۲) به دست می‌آید:

$$F_{Tgt} = (S^T S)^{-1} S^T (Z - DR_{Tgt}) \\ = (S^T S)^{-1} S^T Z - (S^T S)^{-1} S^T DR_{Tgt} \quad (12)$$

در ادامه با اعمال خطای اندازه‌گیری اختلاف زمانی بین سایت‌ها روابط اصلی را اصلاح خواهیم کرد. رابطه (۳) را می‌توان با فرض وجود خطای اندازه‌گیری اختلاف زمانی به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\hat{\tau}_i = \frac{\|F_{Tgt} - F_{Rx,i}\|}{c} - \frac{\|F_{Tgt} - F_{Rx,0}\|}{c} + e_i \\ = \tau_i + e_i \quad (13)$$

$\hat{\tau}_i$  اختلاف زمانی اندازه‌گیری شده بین سایت‌های  $i$  ام و مرجع است که توأم با خطا می‌باشد. این نویز در اندازه‌گیری اختلاف زمان تاخیر را می‌توان با خطا در بردار خطای اندازه‌گیری طول تاخیر در سایت‌ها نیز نشان داد، که این خطا با بردار  $V$  تعریف می‌گردد و طبق رابطه (۱۴) تعریف می‌گردد.

$$V = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_i \ \dots \ v_I]^T \quad (14)$$

متغیره نسبت به نویز اختلاف زمانی است. با بهینه‌سازی این رابطه نسبت به مقدار خطا می‌توان به این نتیجه رسید که بیشینه این تابع به‌ازای خطای موجود در اختلاف زمانی اتفاق می‌افتد. لذا با استفاده از مشتق اول تابع  $C(\cdot)$  تابع -یا پیدا کردن نقطه اکسترمم آن- نسبت به متغیر  $v_1$  خطای کمینه به‌دست خواهد آمد. بنابراین از این تابع می‌توان به‌عنوان تابع هزینه برای تخمین مقدار خطای اختلاف زمانی استفاده نمود و در نتیجه با تصحیح این خطا، دقت مکان‌یابی را تا حد ممکن بالا برد. با توضیحات فوق الگوریتم تخمین خطای تک‌سایتی در روش پیشنهادی به‌صورت متن ویژه ۱ بیان می‌گردد.

### متن ویژه ۱. الگوریتم تخمین خطای تک‌سایتی

۱. ابتدا بردار تاخیر زمانی در سایت‌ها اندازه‌گیری می‌شود.
۲. با بررسی سطح سیگنال به نویز در سایت‌ها، تاخیر حاصل از سایتی که سطح سیگنال به نویز آن کمتر باشد به‌عنوان تاخیری که ممکن است توأم با خطا باشد انتخاب می‌شود.
۳. به‌ازاء مقادیر بیشتر و کمتر از تاخیر سایت خطادار، بردارهای تاخیر متفاوتی به‌طور مصنوعی تولید می‌شوند.
۴. تابع هزینه طبق رابطه (۳۴) به‌ازای مقادیر تولیدشده فوق محاسبه می‌گردد.
۵. مقدار تاخیری که تابع هزینه به‌ازاء آن بیشینه شود مقدار تاخیر اصلاح‌شده می‌باشد.
۶. به‌ازاء مقدار بردار تاخیر اصلاح‌شده موقعیت هدف استخراج گردد.

همان‌گونه که گفته شد معادلات فوق در حالتی حل شدند که فرض شد نویز تنها در یکی از سایت‌ها باعث بروز خطا می‌گردد. این فرض تاحدی با شرایط عملی نیز منطبق است. در عمل اغلب به خاطر چرخش آنتن فرستنده یا نزدیکی هدف به دو سایت و دوری از سایت سوم این اتفاق رخ می‌دهد که با اندازه‌گیری سطح سیگنال دریافتی در سایت‌ها می‌توان تخمین مناسبی از این‌که خطا در کدام یک از سایت‌ها رخ داده را به‌دست آورد. در ادامه معادلات مذکور برای حالت خطا در همه سایت‌ها تعمیم داده می‌شود به‌صورتی که برای همه زمان‌های تاخیر اندازه‌گیری‌شده در سایت‌ها، خطای اندازه‌گیری در نظر گرفته‌شده معادله (۲۰) درحالت کلی حل می‌گردد. در این حالت تابع هزینه یک تابع چند متغیره است (مثلاً در حالت، یک سایت مرکزی و دو سایت دریافت، یک تابع دو متغیره خواهد بود) و به‌ازاء هر مقدار خطا در بردار تاخیر می‌توان یک نقطه متناظر در تابع هزینه جدید داشت. روال الگوریتم نهایی در متن ویژه (۲) آمده است. خطا در همه سایت‌ها تنها باعث تغییر مقادیر پارامترهای رابطه (۳۴) می‌شود و تعریف آن‌ها تغییر نمی‌کند. لذا تعریف همین تابع می‌تواند در الگوریتم تخمین خطای تمام سایتی نیز قابل استفاده باشد. در متن ویژه (۲)،

$$\hat{Q} = Q + \gamma [v_1 \quad 0]^T \quad (25)$$

که  $Q$  ماتریس معادل  $\hat{Q}$  در حالت بدون نویز است. قابل ذکر است که ماتریس تعریف شده  $P$  در حالت بدون نویز و با نویز یکسان می‌باشد. بر اساس  $P$  و  $\hat{Q}$  که در بالا تعریف شده‌اند، معادله اصلی یعنی معادله (۱۷) به فرم معادله درجه دوم رابطه (۲۶) تبدیل می‌گردد:

$$\hat{F}_{Tgt} = P - \hat{Q}R_{Tgt} \quad (26)$$

که این معادله را می‌توان به فرم زیر بازنویسی نمود:

$$\hat{A}R_{Tgt}^2 + \hat{B}R_{Tgt} + \hat{C} = 0 \quad (27)$$

اجزای این معادله عبارتند از :

$$\hat{A} = \hat{Q}^T \hat{Q} - 1 \quad (28)$$

$$\hat{B} = 2P^T \hat{Q} \quad (29)$$

$$\hat{C} = P^T P \quad (30)$$

با حل معادله درجه دوم (۲۷)  $R_{Tgt}$  به‌صورت رابطه (۳۱) به‌دست خواهد آمد :

$$\hat{R}_{Tgt} = \frac{-\hat{B} \pm \sqrt{\hat{B}^2 - 4\hat{A}\hat{C}}}{\hat{A}} \quad (31)$$

با بازنویسی رابطه فوق با استفاده از رابطه (۲۳) و (۲۸) تا (۳۰) داریم:

$$\hat{R}_{Tgt} = \frac{-(B + 2p_1\gamma v_1)}{q_1^2 + 2q_1\gamma v_1 + (\gamma v_1)^2 - q_2^2 - 1} \pm \frac{\sqrt{(B + 2p_1\gamma v_1)^2 - 4\hat{A}\hat{C}}}{q_1^2 + 2q_1\gamma v_1 + (\gamma v_1)^2 - q_2^2 - 1} \quad (32)$$

که  $B$  ماتریس معادل در حالت بدون نویز برای معادله (۲۸) است و طبق رابطه (۳۲) تعریف می‌شود.

$$B = 2P^T Q \quad (33)$$

در حالت کلی عدد حاصل از معادله (۳۲) یک عدد مختلط می‌باشد. بلادی برای حالت بدون خطا نشان داده بخش داخل رادیکال عددی همواره منفی است [۱۰]. با دقت در رابطه (۳۲) مشاهده می‌شود خطای حاصل چنانچه عدد نسبتاً کوچکی باشد داخل رادیکال همچنان از صفر کوچکتر می‌باشد. لذا براحتی بخش موهومی و حقیقی رابطه (۳۲) از یکدیگر قابل تفکیک می‌باشند. بخش حقیقی این تابع می‌تواند به‌صورت رابطه (۳۴) نوشته شود:

$$C(v_1) = \frac{-(B + 2p_1\gamma v_1)}{q_1^2 + 2q_1\gamma v_1 + (\gamma v_1)^2 - q_2^2 - 1} \quad (34)$$

همان‌طور که در این رابطه مشاهده می‌شود،  $C(\cdot)$  تابعی تک

(تأخیرهای زمانی که دچار خطا شده‌اند) محاسبه گردید که هر واحد زمانی در شبیه‌سازی معادل ۵۰ نانو ثانیه بوده است. چنانچه در توضیحات بخش قبل ذکر شد، روش پیشنهادی این مقاله، بهینه‌سازی روش بلادی [۱۰] است به‌گونه‌ای که معادلات مکان‌یابی با در نظر گرفتن نویز جمع‌شده در اختلاف زمانی بین سایت‌ها بازنویسی شوند. بدین ترتیب معادله نهایی تقریب‌زده شده شامل مولفه‌های خطای اندازه‌گیری نیز خواهد بود. در نهایت معادله نهایی به‌گونه‌ای بهینه‌سازی می‌گردد که اثر نویز در آن به حداقل برسد و بدین ترتیب روش پیشنهادی می‌تواند با اصلاح روش بلادی، آن را نسبت به نویز اندازه‌گیری سایت‌ها مقاوم نماید. با این دیدگاه به نظر می‌رسد بهترین اثبات برای عملکرد روش پیشنهادی این مقاله مقایسه نتایج آن با روش بلادی باشد (در واقع مقایسه روش اصلی و روش اصلاح شده). بر همین اساس جهت مقایسه نتایج، روش معرفی شده توسط بلادی و همکاران [۱۰] به‌عنوان الگوریتم مبنا نیز شبیه‌سازی شده و با اعمال مقادیر توأم با خطای تاخیرها به آن موقعیت تخمینی از عملکرد آن نیز به‌دست آمد. جدول ۱، مشخصات این آزمون‌ها را نشان می‌دهد. موضوع قابل توجه دیگر در این سناریو این است که در هر نقطه مختصاتی هدف تنها یک‌بار محاسبات تخمین انجام می‌گردد. در عمل معمولاً به دلیل تکرار ارسال سیگنال پالس از هدف در هر نقطه امکان تکرار این محاسبات در هر نقطه فراهم است.

جدول ۱. مشخصات سناریوی تست الگوریتم

عنوان مشخصه	مقدار یا شرح مقادیر
تعداد سایت‌ها	یک سایت مرکزی و دو سایت کناری
فاصله سایت‌ها از سایت مرکزی	۱ کیلومتر
چینش سایت‌ها	خطی شکل (مشابه شکل ۱)
موقعیت هدف	نقاط مختلف روی یک قطاع ۹۰ درجه‌ای از دایره به شعاع ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلومتری و ارتفاع ۱ کیلومتری حول مبدا مختصات
رزولوشن زمانی شبیه‌سازی	۵ نانو ثانیه
محدوده خطای زمانی اعمالی	$\pm 750$ نانو ثانیه
محدوده تغییر اختلاف تاخیر در شبیه‌سازی	$\pm 2000$ نانو ثانیه
تعداد تکرار هر آزمون	۴۰۰
تعداد داده به‌ازاء هر نقطه مختصاتی هدف	۱

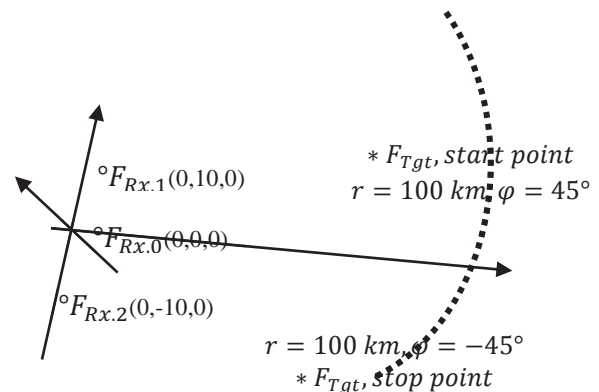
### ۳-۱. سناریوی اول

در سناریوی اول شبیه‌سازی، خطای اندازه‌گیری فقط به مشاهده یکی از سایت‌ها اضافه شد که چنانچه ذکر شد تداعی

چگونگی تخمین خطا در این حالت ملاحظه می‌گردد.

متن ویژه ۲. الگوریتم تخمین خطای تمام سایتی

۱. ابتدا بردار تاخیر زمانی در سایت‌ها اندازه‌گیری می‌شود.
۲. به‌ازاء مقادیر بیشتر و کمتر از تاخیر سایت‌ها، بردارهای تاخیر متفاوتی به‌طور مصنوعی تولید می‌شوند.
۳. تابع هزینه طبق رابطه (۳۴) به‌ازای مقادیر تولیدشده فوق محاسبه می‌گردد.
۴. مقدار بردار تاخیری که تابع هزینه به‌ازاء آن بیشینه شود مقدار بردار تاخیر اصلاح‌شده می‌باشد.
۵. به‌ازاء مقدار بردار تاخیر اصلاح‌شده موقعیت هدف استخراج گردد.



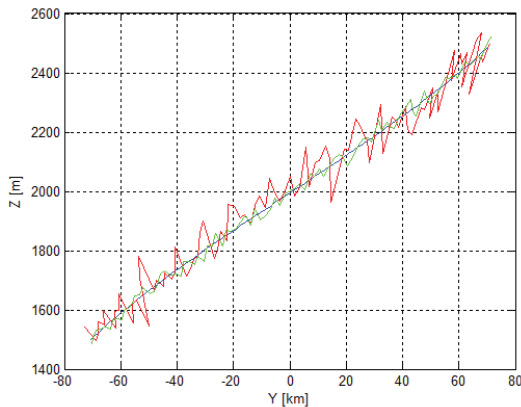
شکل ۲. نمای از نحوه چینش سایت‌ها و مسیر هدف در شبیه‌سازی‌های این پژوهش (به‌ازاء فاصله ۱۰۰ کیلومتری)

### ۳. شبیه‌سازی و نتایج

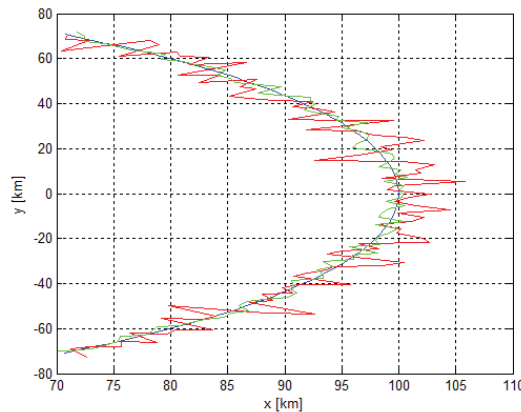
جهت بررسی عملکرد روش پیش‌گفته، در محیط MATLAB2012 دو سناریو جهت ارزیابی آن اجرا شد. در این دو سناریو، سه سایت دریافت‌کننده و یک هدف حضور داشتند. سایت‌ها مشابه شکل (۲) به شکل خطی و به فواصل ۱۰ کیلومتر از سایت مرکزی واقع شده‌اند و یک هدف بر روی یک دایره به شعاع‌های ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۱۲۵، ۱۵۰، ۱۷۵ و ۲۰۰ کیلومتری از سایت وسطی و در زوایای مختلف قرار می‌گیرد، که البته یک قطاع ۹۰ درجه‌ای از این دایره در شبیه‌سازی‌ها وارد شده است.

هدف فرضی در نقاط مختلف فضا شبیه‌سازی شده و مقدار دقیق اختلاف زمانی حاصل در سایت‌ها محاسبه گردید. پس از تعیین مقدار TDOA دریافتی در سایت‌ها، در مقادیر آن‌ها خطاهایی به عمد وارد شد. خطا توسط تابع تصادفی خطی در محدوده  $-750$  تا  $750$  نانوثانیه تولید شد که این مقادیر به‌عنوان تاخیرهای زمانی ورودی تابع هزینه استفاده گردیدند. برای این منظور تابع هزینه به‌ازاء اختلاف زمان‌های  $\pm 2000$  تا  $-2000$  نانو ثانیه، حول مقدار تاخیر ورودی تابع هزینه

۴۰۰ نقطه روی قطاع و سایر شرایط مطابق جدول ۱ آزمون



(الف)



(ب)

شکل ۴. نتایج مکان‌یابی با سناریوی اول و فاصله هدف ۱۰۰ کیلومتر، نقاط آبی مسیر حرکت هدف، نقاط قرمز حاصل از حل معادله بلادی و نقاط سبز حاصل از روش پیشنهادی (در حالت توأم با خطای اندازه‌گیری اختلاف زمان)، (الف) نمودار محور  $Y-Z$  و (ب) نمودار محور  $X-Y$

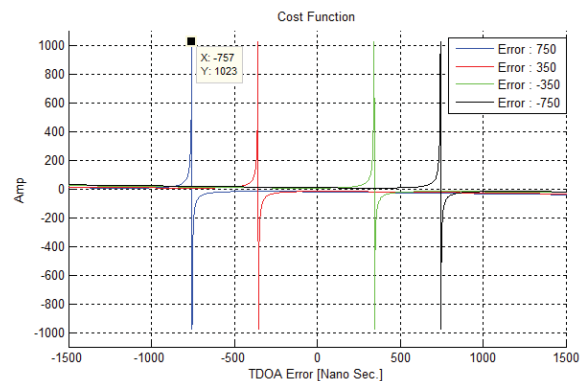
تکرار گردید. در شکل ۶ مکان‌های شبیه‌سازی شده اهداف و مکان‌های یافت‌شده توسط الگوریتم پیشنهادی و روش بلادی به‌صورت هم‌زمان نمایش داده شده‌اند که بیشترین اختلاف بین مکان یافت‌شده و هدف اصلی در روش پیشنهادی به دو کیلومتر بالغ می‌شود و این درحالی است که همین خطا برای روش بلادی به چهار کیلومتر بالغ می‌شود.

بدین ترتیب در این سناریو کماکان شاهد برتری عملکرد روش پیشنهادی این مقاله نسبت به روش مبنای بلادی می‌باشیم.

### ۳-۳- بحث و بررسی نتایج

برای آزمون روش پیشنهادی دو سناریوی مجزا مبتنی بر ایجاد خطای اندازه‌گیری فقط در یک سایت و ایجاد خطای اندازه‌گیری در همه سایت‌ها که هر دو مبتنی بر ملاحظاتی از شرایط واقعی هستند، اجرا شد. در هر سناریو پس از اصلاح خطا، مکان‌یابی انجام پذیرفته و نتایج با مقادیر شبیه‌سازی

کننده شرایطی است که هدف از یکی از سایت‌ها دورتر بوده و یا آنتن فرستنده چرخشی و الگوی آن باریک باشد. با استفاده از روش ذکر شده در متن ویژه (۱) مقدار تاخیر برای این سایت اصلاح شد. سپس با استفاده از تاخیر اصلاح شده فوق، مکان قرارگیری هدف با حل معادلات مکانی حاصل گردید. شکل ۳ چند نمودار دامنه تابع هزینه را در این حالت نشان می‌دهد. نمودارهای این شکل برای هدف در فاصله ۱۰۰ کیلومتر و به‌ازای مقادیر خطای تاخیر  $-۷۵۰$ ،  $-۳۵۰$ ،  $۰$ ،  $۳۵۰$  و  $۷۵۰$  نانوثانیه ترسیم شده‌اند که مقادیر به  $-۳۰۰$ ،  $۵۰$  و  $۶۵۰$  نانوثانیه اصلاح شده‌اند. در سناریوی اول به‌ازای تمام ۴۰۰ نقطه روی قطاع و سایر شرایط جدول ۱ آزمون تکرار گردید. نتایج مکان‌یابی با این سناریو در شکل ۴ آمده است. چنان‌که ملاحظه می‌شود، بیشینه خطای مکان یافت‌شده با روش بلادی ۲۵۰۰ متر است درحالی‌که با روش پیشنهادی این خطا ۱۰۰۰ متر می‌باشد.

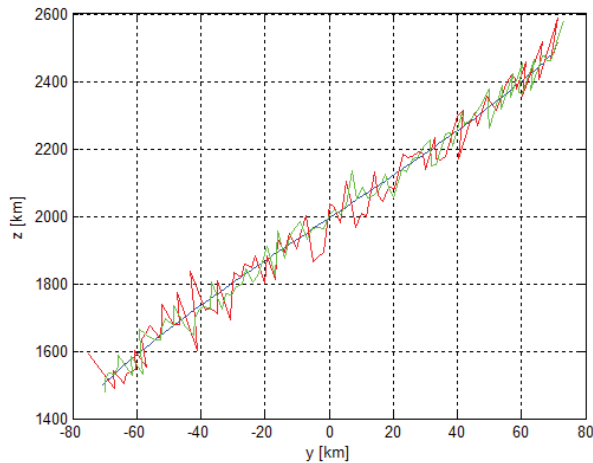


شکل ۳. نمودار دامنه تابع هزینه  $C(.)$  بر حسب تاخیرهای زمانی متفاوت و با وجود خطای اندازه‌گیری در اختلاف زمان دریافت یک سایت، و با مشخصات سناریوی اولیه به‌ازای خطای  $-۷۵۰$ ،  $-۳۵۰$ ،  $۰$ ،  $۳۵۰$  و  $۷۵۰$  نانوثانیه

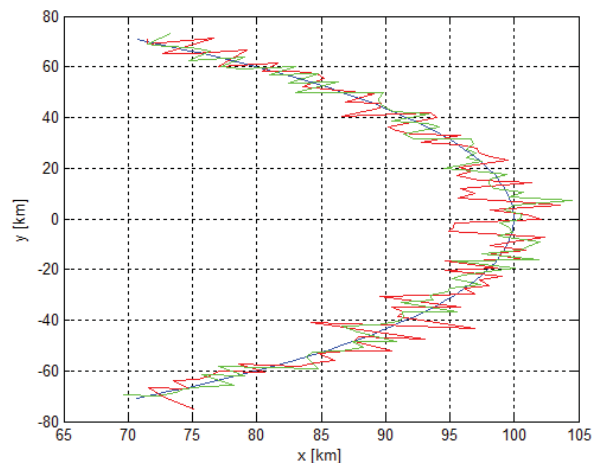
### ۲-۳- سناریوی دوم

در سناریوی دوم، حالت عملی‌تری شبیه‌سازی شد که در آن خطا در هر سه سایت اعمال گردید سپس با روش تکمیلی که در متن ویژه (۲) معرفی شد، این خطا تخمین زده‌شده و اصلاح گردید. نمونه‌ای از نتایج این آزمون برای هدف در فاصله ۱۰۰ کیلومتری در شکل ۵ ملاحظه می‌شود. این شبیه‌سازی در شرایطی رخ داده است که میزان خطای  $[-۳۰۰ - ۲۵۰]$ ،  $[۳۵۰ - ۵۵۰]$  و  $[-۷۵۰ ۷۵۰]$  نانوثانیه به‌ترتیب اندازه‌گیری سایت‌های [۱] [۲] اضافه شده و پس از اصلاح، این خطاها به‌ترتیب به‌میزان  $[-۲۵۰ - ۲۰۰]$ ،  $[۳۰۰ - ۵۰۰]$  و  $[-۷۵۰ - ۷۰۰]$  نانوثانیه اصلاح شده‌اند. سپس با استفاده از خطای اصلاح‌شده محل هدف حاصل شد، و سرانجام با مقادیر اولیه مکان اهداف، مقایسه گردید در سناریوی دوم به‌ازای تمام

الف) [۳۵۰ -۵۵۰] (ب) [۳۰۰ -۲۵۰] (ج) [۷۵۰ -۷۵۰] نانوثانیه که در آن بردار فاصله هدف تا مبدا مختصات  $R_{Tgt}$  و فاصله حاصل شده همان هدف (در واحد متر) در هر سناریو با  $R_{Tgt}^e$  نشان داده شده است.



(الف)



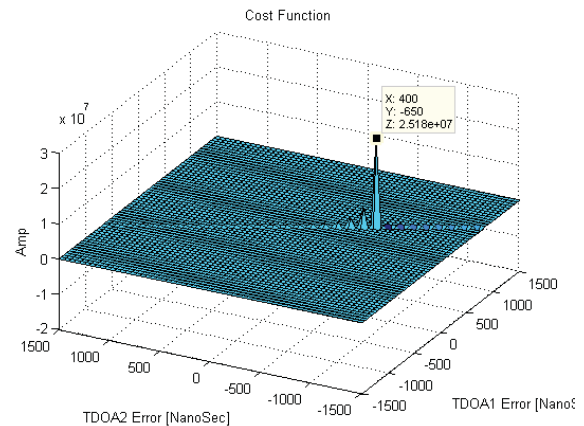
(ب)

شکل ۶. نتایج مکان‌یابی با سناریوی دوم و فاصله هدف ۱۰۰ کیلومتر، نقاط آبی مسیر حرکت هدف، نقاط قرمز حاصل از حل معادله بلادی و نقاط سبز حاصل از روش پیشنهادی (در حالت توأم با خطای اندازه‌گیری اختلاف زمان)، الف) نمودار محور Y-Z و ب) نمودار محور x-y

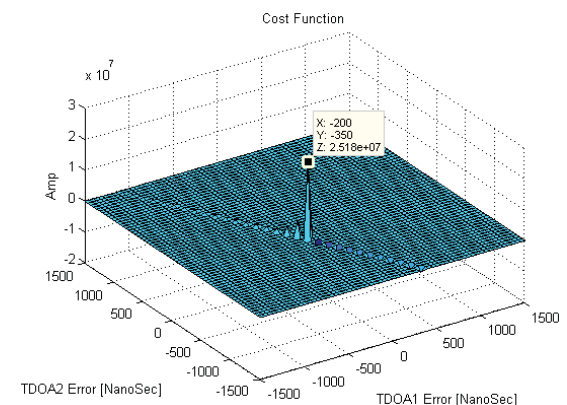
بررسی مقادیر ذکر شده در جدول اخیر به همراه شرایط دو سناریو که در جدول (۱) آمده‌اند، نشان می‌دهند که حتی در شرایطی که تا ۷۵۰ نانوثانیه نویز اندازه‌گیری داشته باشیم، اهداف تا فاصله ۱۰۰ کیلومتر با خطای کمتر از ۱ کیلومتر و تا ۲۰۰ کیلومتر با خطای حدود ۳ کیلومتر قابل مکان‌یابی هستند. همچنین مقایسه دو ستون سوم و چهار جدول فوق حاکی از دقت بهتر روش پیشنهادی این مقاله در مکان‌یابی اهداف نسبت به روش بلادی می‌باشد. چنانکه ملاحظه می‌شود در سناریوی اول، خطای حاصل شده از روش بلادی برای اهداف در فواصل

مقایسه شدند. برای انجام مقایسه علاوه بر روش پیشنهادی، روش پایه بلادی [۱۰] نیز اجرا شد، و نتایج دو روش با معیار شناخته شده متوسط قدرمطلق خطای فاصله  $MAE^1$  طبق رابطه (۳۵) مقایسه می‌گردند:

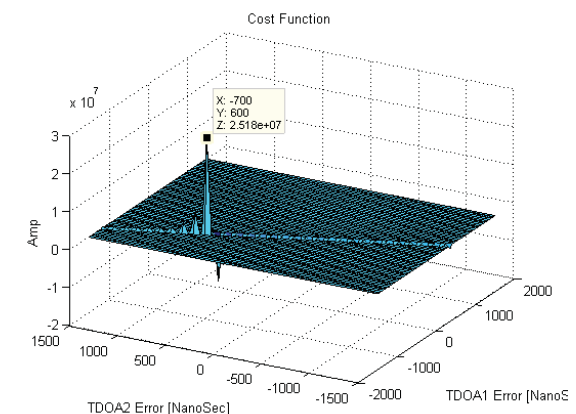
$$MAE = E|R_{Tgt} - R_{Tgt}^e| \quad (35)$$



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵. نمودار دامنه تابع هزینه  $C(\cdot)$  بر حسب تاخیرهای زمانی متفاوت و با وجود خطای اندازه‌گیری در اختلاف زمان دریافت دو سایت، و با مشخصات سناریوی دوم به ازای خطای

<sup>1</sup> Mean Absolute Error

هدف واقع در ۲۰۰ کیلومتری به حداقل ۲۶۰۰ متر بالغ می‌گردد. در سناریوی دوم نیز عملکرد روش پیشنهادی این مقاله در برد ۱۰۰ کیلومتر، حداقل حدود ۱۲۰۰ متر و در برد ۲۰۰ کیلومتری، حداقل ۲۷۰۰ متر بهبود در مکان‌یابی را نسبت به روش مبنا به‌دست داد. بر این اساس می‌توان روش مقاله را به‌عنوان انتخابی مناسب برای مکان‌یابی اهداف، مبتنی بر اختلاف زمان دریافت سیگنال‌های تابشی آن‌ها خصوصاً در محیط‌های با چگالی نویز بالا پیشنهاد نمود.

## ۵. مراجع

- [1] Ikoma, N., Tokunaga, O., Kawano, H., and Maeda, H., (2009). "Tracking 3D Sound Source Location by Particle Filter With TDOA and Signal Power Ratio." Proc., ICROS-SICE., International Joint Conf., Fukuoka., Japan, PP. 1374-1377.
- [2] Li, H., Wang, J., and Liu, Y., (2009). "Passive Coherent Radar Tracking Algorithm Based on Particle Filter and Multiple TDOA Measurements." Proc., 2rd Int. Congress on Image and Signal Processing., Tianjin, China, PP. 1-4.
- [3] Bull, J. F., (2009). "Wireless Geolocation." IEEE Vehicular Technology Magazine ., Vol. 4, No. 4, PP. 45-53.
- [4] Camlica, S., and Tanik, Y., (2009). "Recursive Geolocation with Time Differences of Arrival." Proc., 17rd IEEE. Conf. on Signal Processing and Communications Applications., Antalya, Turkey, PP. 888-891.
- [5] Rappaport, T. S., Reed, J. H., and Woerner, B. D., (1996). "Position Location Using Wireless Communications on Highways of the Future." IEEE Communications Magazine., Vol. 34, No. 10, PP. 33-41.
- [6] Mir, H., and Sahr, J., (2007). "Passive Direction Finding Using Airborne Vector Sensors in the Presence of Manifold Perturbations ." IEEE Transactions on Signal Processing., Vol. 55, No. 1, PP. 156-164.
- [7] Musicki, D., Kaune, R., and Koch, W., (2010). "Mobile Emitter Geolocation and Tracking Using TDOA and FDOA Measurements." IEEE Transactions on Signal Processing ., Vol. 58, No. 3, PP. 1863-1874.
- [8] Kaplan, D. (1996). Understanding GPS Principles, ArtechHouse Pub. Co., Boston.
- [9] Okello, N., (2006). "Emitter Geolocation with Multiple UAVs." Proc., 9rd Int. Conf. on Information Fusion., Florence, Italy, PP. 1-8.
- [10] Beladi, S., and Pathirana, P., (2008). "TDOA Based Emitter Localization With Minimum Number of Receivers and Power Measurement." Proc., 10rd Int. Conf. on Control, Automation Robotics and vision ., Hanoi, Vietnam, PP. 1259-1264.

مختلف، حدود ۲/۵ درصد فاصله هدف می‌باشد درحالی‌که همین خطا با روش پیشنهادی حداکثر ۱ درصد فاصله هدف می‌باشد که نشان از کاهش قابل توجه خطا با روش پیشنهادی دارد.

در سناریوی دوم، شرایط نسبتاً عملی‌تری در نظر گرفته شده‌اند که در بخش زیرین جدول (۱) نتایج آن آمده است، دیده می‌شود خطای حاصل شده در این سناریو با روش بلادی ۳ درصد فاصله هدف شده درحالی‌که همین خطا با روش پیشنهادی حداکثر ۱/۵ درصد حاصل شده است. این نتایج نیز نشان از برتری کارایی روش پیشنهادی نسبت به روش بلادی می‌باشد.

**جدول ۲.** مقایسه متوسط قدرمطلق خطای روش پیشنهادی با روش مبنا (طبق مشخصات جدول ۱)

سناریو	فاصله هدف (کیلومتر)	خطای حاصل از روش مبنا (متر)	خطای حاصل از روش پیشنهادی (متر)
سناریوی اول	۵۰	۸۰۰	۲۸۰
	۷۵	۱۳۰۰	۴۷۰
	۱۰۰	۱۷۶۰	۶۴۰
	۱۲۵	۲۴۰۰	۹۹۰
	۱۵۰	۲۹۷۰	۱۲۰۰
	۱۷۵	۳۹۳۰	۱۷۰۰
سناریوی دوم	۲۰۰	۴۸۰۰	۲۲۵۰
	۵۰	۱۱۰۰	۴۰۰
	۷۵	۱۴۸۰	۵۹۰
	۱۰۰	۲۲۵۰	۹۷۰
	۱۲۵	۲۹۹۰	۱۴۹۰
	۱۵۰	۳۵۷۰	۲۱۵۰
	۱۷۵	۴۸۴۰	۲۸۲۰
	۲۰۰	۵۹۰۰	۳۲۰۰

## ۴. نتیجه‌گیری

تعیین موقعیت اهداف از روی اختلاف زمانی دریافت سیگنال‌های ساده شده از آنها روش متعارفی برای مکان‌یابی اهداف به‌شمار می‌آید که یکی از چالش‌های اصلی آن وجود خطای اندازه‌گیری در سایت‌های دریافت سیگنال می‌باشد. در این پژوهش روشی جدید مبتنی بر تخمین و جبران‌سازی این خطاها به‌منظور بهبود عملکرد مکان‌یابی مبتنی بر اختلاف زمان‌های دریافت، ارائه گردید. در روش مزبور، بازنویسی معادلات مکان‌یابی نویزهای اندازه‌گیری، منجر به حصول تابع هزینه‌ای برحسب خطاها و سایر پارامترهای سامانه مکان‌یابی شد؛ بهینه‌سازی این تابع تخمینی از خطای اندازه‌گیری را به‌دست می‌دهد.



## **A New Method for Minimization of the Effect of Noise in Measuring Delays Between Receiver Sites in Geolocation Based on TDOA of Signals**

**S. V. Shojadini\*, R. Kabiri, A. Kermani, M. Fereydooni**

Iranian Research Organization for Science and Technology

(Received: 09/03/2015, Accepted: 19/12/2015)

### **Abstract**

In this paper a new method is presented which minimizes the destructive effects of measurement noise belonging to delays between receiver sites in accuracy of locating targets. For this purpose the geolocation equations are re-written by considering measurement error, therefore a cost function is introduced subject to position of sites, time difference of arrival of signals and measurement noise. By optimizing this function an estimation of the measurement error is obtained and a considerable improvement may be performed in locating targets by correcting existing delays by applying the above estimated values. Performance of the proposed method is evaluated in two different scenarios, corresponding to real conditions. As a result an accuracy improvement of about 1100 meters is achieved for target detection, in both scenarios compared to existing positioning method which doesn't contain the proposed compensation.

### **Keywords**

Positioning, TDOA, measured noise, cost function.

---

\* Corresponding author E-mail: shojadini@irost.ir