مکانیابی غیر فعال منبع با استفاده از اندازه‌گیری توام TDOA، AOA ،GROA

سعید فولادی تالاری[۱] **کمال محامدپور**[۲]

۱- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی- تهران- ایران
s.fooladi@ee.kntu.ac.ir

۲- استاد- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران- ایران
kmpour@kntu.ac.ir

چکیده: مکانیابی غیرفعال منبع یکی از زمینه های بسیار پرکاربرد در مباحث تجاری و نیز در تحقیقات نظامی است. در این مقاله روشی برای مکانیابی با استفاده از اندازه‌گیری های توام اختلاف زمان ورود (TDOA)، نسبت گین ورود (GROA)، زاویه ورود (AOA) سیگنال دریافتی در چند سنسور ارائه می شود. کارایی مکانیابی با استفاده از این گونه اندازه‌گیری ها و در مقایسه با استفاده تنها از هر یک از اندازه‌گیری ها بررسی شده است. با ارائه باند پایین تخمین نشان داده می شود که استفاده توام از این اندازه‌گیری‌ها باعث بهبود کارآیی در تمامی دقت‌های اندازه‌گیری شده و تخمینگر ارائه شده کارایی برابر این باند پایین تخمین دارد.

واژه های کلیدی: مکانیابی غیر فعال منبع ، مکانیابی تلفیقی، اختلاف زمان ورود سیگنال، نسبت گین ورود سیگنال، زاویه ورود سیگنال.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۳/۳۰

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۷/۱۰/۱۰

نام نویسنده‌ی مسئول: مهندس سعید فولادی تالاری

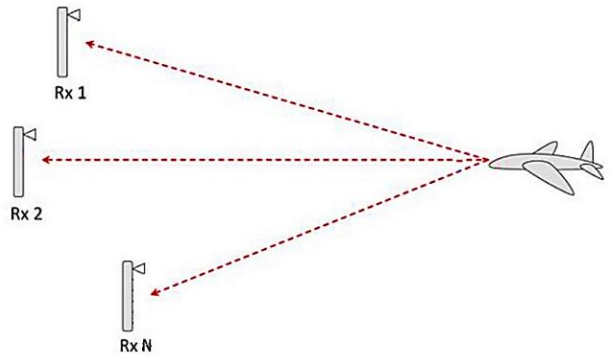
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – تهران – سیدخندان–دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

۱- مقدمه

مکانیابی غیر فعال فرستنده هدف بسیاری از کاربردها در زمینه های رادار، سونار [۴]-[۱]، مخابرات بیسیم [۶]-[۵]، آرایه میکروفن ها [۷]، شبکه سنسوری [۹]-[۸] است. در مکانیابی غیر فعال منبع، سیگنال دریافتی حامل اطلاعاتی مانند زمان دریافت، توان دریافتی و جهت دریافتی است. روش های متفاوت مکانیابی که تا کنون ارائه شده اند هر کدام تعدادی از این اطلاعات را استفاده می کنند.

اندازه‌گیری اختلاف زمان دریافت سیگنال در تعدادی سنسور که TDOA (Time Difference of Arrival) نامیده می شود، معمول ترین روش مکانیابی است [۱۴]-[۱۰]. اگر حرکت نسبی بین هدف و سنسورها وجود داشته باشد از اندازه‌گیری های اختلاف فرکانس که FDOA (Frequency Difference of Arrival) نامیده می شود، می توان برای بهبود دقت تخمین استفاده کرد [۱۶]-[۱۵]. از سویی دیگر اطلاعات نسبت گین سیگنال دریافتی که GROA (Gain Ratio of Arrival) نامیده می شود، می تواند برای مکانیابی استفاده شود [۱۹]-[۱۷]. علاوه بر این مکانیابی با زاویه ورود که از تلاقی زوایای ورود تخمین زده شده سیگنال در سنسورها استفاده می کند نیز می تواند برای مکانیابی استفاده شود [۶]، [۲۰]. اخیرا برای بهبود دقت مکانیابی علاقه بسیاری برای استفاده توام از این اندازه گیری ها ایجاد شده است [۲۱]-[۲۸] اندازه‌گیری های TDOA و GROA با فاصله سنسور از هدف ارتباط دارند. استفاده توام از این اندازه‌گیری ها دقت بهتر مکانیابی را فراهم می کند. یک روش برای مکانیابی منابع صوتی در فضای دو بعدی در [۲۴] ارائه شده است که از ترکیب TDOA و GROA استفاده می کند. HO و همکارانش این روش را به حالت عام توسعه دادند و باند کارامر رائو (CRLB) و تخمینگر WLS (Weighted Least Square) برای استفاده توام از اندازه‌گیری TDOA و GROA در مکانیابی را ارائه دادند. تاثیر جغرافیای سنسورها و هدف بر دقت اندازه‌گیری در این حالت در [۲۶] ارائه شده است. روش مکانیابی تلفیقی با استفاده از TDOA و AOA در [۲۷]-[۲۸] ارائه شده است. روش هایی برای مکانیابی نسبت به فاصله هدف در [۲۹]-[۳۰] در ارائه شده اند.

در این مقاله مکانیابی تلفیقی با استفاده توام از اندازه‌گیری های TDOA، GROA و AOA ارائه شده است. روش ارائه شده در این مقاله با توسعه روش ارائه شده در [۲۵] و افزایش AOA به آن به کارایی بهتر از آن دست می یابد. از لحاظ عملی برای افزایش AOA به اندازه‌گیری ها باید ساختار سنسورها تغییر کند و از آنتن جهتی یا آنتن آرایه فازی و یا آرایه آنتن استفاده شود. تعداد سنسورها در مقاله متغیر در نظر گرفته شده است و محاسبات برای فضای دو بعدی ارائه شده اند. CRLB برای مکانیابی با استفاده از این اندازه‌گیری ها ارائه شده است که دقت تخمینگر در رسیدن به این CRLB را نشان می‌هد. در این مقاله فرض شده است سنسورها به اندازه‌گیری TOA،



شکل (۱): سناریوی قرارگیری سنسورها و هدف در مکانیابی غیرفعال منبع

GOA و AOA از سیگنال ورودی می پردازند و سپس با تلفیق این اندازه‌گیری ها در سنسور مرکزی مکانیابی تلفیقی انجام می شود. روش ارائه شده به طور مستقیم با اندازه‌گیری ها کار می‌کند و فرمول ها در فضای ۲ بعدی ارائه شده است. تحلیل بخش بدست آوردن اندازه‌گیری ها از سیگنال در آینده بررسی خواهد شد. ساختار این مقاله به شکلی است که در بخش ۲ مدل اندازه‌گیری ها و باند پایین تخمین (CRLB) ارائه شده است. روش مکانیابی در بخش ۳ و شبیه سازی ها در بخش ۴ ارائه شده اند. نتیجه گیری در بخش ۵ ارائه شده است.

۲- مدل سیستم

سناریوی مکانیابی در شکل (۱) نشان داده شده است. همنطور که مشاهده می شود، N سنسور غیر فعال جهت مکانیابی به کارگرفته شده اند. هر سنسور که با اندیس i نشان داده می شود و در مکان $\underline{p}_i = [x_i \quad y_i \quad z_i]^T$ قرار دارد سیگنال ارسالی از هدفی که در مکان $\underline{p}_t = [x_t \quad y_t \quad z_t]^T$ قرار دارد را دریافت می کند. سیگنال دریافتی در این سنسورها را می توان به صورت زیر نشان داد.

$$x_i(t) = \frac{1}{g_i} s(t-\tau_i) a(\theta_i) \qquad (۱)$$

که $s(t)$ سیگنال ارسالی، τ_i تاخیر دریافت سیگنال در سنسور iام، g_i تضعیف سیگنال دریافتی و θ_i جهت سیگنال دریافتی در سنسور iام است. $a(\theta_i)$ تابع زاویه است که پارامتر زاویه سیگنال دریافتی را نمایش می دهد این تابع می توان الگو تخمین زاویه در نظر گرفته شود که در راستای اصلی یعنی θ_i در هر سنسور مقدار برابر ۱ دارد. مقادیر این پارامتر ها برابرند با

$$\tau_i = \frac{r_i}{c}$$
$$g_i = (r_i)^{\gamma} \qquad i = 1, 2, \ldots, N \qquad (۲)$$
$$\theta_i = a\tan\left(\frac{y_t - y_i}{x_t - x_i}\right)$$

که $r_i = \| \underline{p}_t - \underline{p}_i \|$ فاصله سنسور iام از هدف، c سرعت انتشار سیگنال، مولفه γ افت مسیر است که معمولا برابر ۱ در نظر گرفته می شود. $\| \underline{x} \|$ نشان دهنده نرم بردار $\underline{x}$ است.

۲-۱- مدل اندازه‌گیری ها

بعد از دریافت سیگنال در هر سنسور اندازه‌گیری های TOA، GOA و AOA از سیگنال ورودی انجام می شود. سپس این اطلاعات به سنسور مرکزی ارسال می گردد. در سنسور مرکزی TDOA و GROA ها محاسبه شده سپس به همراه AOA ها جهت مکانیابی مورد استفاده قرار می گیرد. مقادیره اندازه گیری شده در سنسور مرکزی را به ترتیب با $\hat{\tau}_{ij}$ که اختلاف زمان دریافت در سنسور iام و jام، $\hat{g}_{ij}$ که نسبت تضعیف در سنسور jام نسبت به سنسور iام، $\hat{\theta}_i$ که زاویه دریافت در سنسور iام است، نشان می دهیم. $\hat{x}$ به معنای اندازه‌گیری نویزی از x است. این مقادیر اندازه‌گیری شده در فرمول زیر نشان داده شده اند.

$$\begin{aligned} \hat{\tau}_{ij} &= \tau_i - \tau_j + n_{\tau_{ij}} = \frac{r_j - r_i}{c} + n_{\tau_{ij}} \\ \hat{g}_{ij} &= \frac{g_i}{g_j} + n_{g_{ij}} = \frac{r_i}{r_j} + n_{g_{ij}} \qquad i,j=1,2,..,N \\ \hat{\theta}_i &= a\tan\left(\frac{y_t - y_i}{x_t - x_i}\right) + n_{\theta_i} \end{aligned} \tag{۳}$$

که عبارات $n_{\tau_{ij}}$، $n_{g_{ij}}$ و n_{θ_i} به ترتیب نشان دهنده نویز اندازه‌گیری های TDOA، GROA و AOA هستند. سپس بردار اندازه‌گیری از این اندازه‌گیری ها تشکیل می شود این بردار برابر است با

$$\begin{aligned} &\hat{\underline{k}} = \underline{k} + \underline{n}_k \quad (3N-2)\times 1 \\ &\underline{k} = [\underline{\tau}^T \quad \underline{g}^T \quad \underline{\theta}^T]^T \quad (3N-2)\times 1 \\ &\underline{\tau} = [\tau_{21} \quad \tau_{31} \quad \cdots \quad \tau_{N1}]^T \quad (N-1)\times 1 \qquad i,j=1,..,N \\ &\underline{g} = [g_{21} \quad g_{31} \quad \cdots \quad g_{N1}]^T \quad (N-1)\times 1 \\ &\underline{\theta} = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \cdots \quad \theta_N]^T \quad N\times 1 \\ &\underline{n}_k = [\underline{n}_\tau^T \quad \underline{n}_g^T \quad \underline{n}_\theta^T]^T \quad (3N-2)\times 1 \end{aligned} \tag{۴}$$

بردار $\hat{\underline{k}}$ نشان دهنده مقادیر اندازه‌گیری شده است. بردارهای $\underline{k}$ و $\underline{n}_k$ به ترتیب نشان دهنده مقادیر درست اندازه گیری ها و نویز اندازه‌گیری ها هستند.

۲-۲- باند پایین کرامر رائو (CRLB)

در این بخش باند پایین تخمین مکان با استفاده از اندازه‌گیری های تلفیقی TDOA، GROA و AOA را ارائه می دهیم.

برخلاف روشی که در [۲۶] ارائه شده است. ما CRLB را به طور ساده با استفاده از ماتریس فیشر اطلاعات بدست می آوریم. ماتریس CRLB برای $\underline{p}_t$ عبارتست از [۲۷]

$$CRLB(\underline{p}_t) = FIM^{-1}(\underline{p}_t) \tag{۵}$$

ماتریس FIM نشان دهنده ماتریس فیشر اطلاعات است. با توجه به فرض گوسی بودن نویز بردار اندازه‌گیری ها $\hat{\underline{k}}$، ماتریس فیشر اطلاعات اندازه گیری برابر است با

$$FIM(\underline{p}_t) = \left(\frac{\partial \underline{k}}{\partial \underline{p}_t^T}\right)^T Q^{-1} \left(\frac{\partial \underline{k}}{\partial \underline{p}_t^T}\right) \tag{۶}$$

که بردار $\frac{\partial \underline{k}}{\partial \underline{p}_t^T}$ به صورت زیر تعریف می شود.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \underline{k}}{\partial \underline{p}_t^T} &= \begin{pmatrix} \frac{\partial \underline{\tau}}{\partial \underline{p}_t^T} & \frac{\partial \underline{g}}{\partial \underline{p}_t^T} & \frac{\partial \underline{\theta}}{\partial \underline{p}_t^T} \end{pmatrix}^T = \\ &[\frac{\partial \tau_{21}}{\partial \underline{p}_t^T} \quad \cdots \quad \frac{\partial \tau_{N1}}{\partial \underline{p}_t^T} \quad \frac{\partial g_{21}}{\partial \underline{p}_t^T} \quad \cdots \\ &\frac{\partial g_{N1}}{\partial \underline{p}_t^T} \quad \frac{\partial \theta_1}{\partial \underline{p}_t^T} \quad \cdots \quad \frac{\partial \theta_N}{\partial \underline{p}_t^T}]^T \end{aligned} \tag{۷}$$

مقادیر $\frac{\partial \tau_{i1}}{\partial \underline{p}_t^T}$، $\frac{\partial g_{i1}}{\partial \underline{p}_t^T}$ و $\frac{\partial \theta_i}{\partial \underline{p}_t^T}$ عبارتند از

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tau_{i1}}{\partial \underline{p}_t^T} &= \frac{1}{c}\left(\frac{[\underline{p}_t - \underline{p}_i]^T}{r_i^2} - \frac{[\underline{p}_t - \underline{p}_1]^T}{r_1^2}\right) \\ \frac{\partial g_{i1}}{\partial \underline{p}_t^T} &= \frac{r_i}{r_1}\left(\frac{[\underline{p}_t - \underline{p}_i]^T}{r_i^2} - \frac{[\underline{p}_t - \underline{p}_1]^T}{r_1^2}\right) \\ \frac{\partial \theta_i}{\partial \underline{p}_t^T} &= \frac{1}{r_i^2}\left(-(y_t - y_i) \quad (x_t - x_i)\right)^T \end{aligned} \tag{۸}$$

با فرض استقلال نویزهای اندازه‌گیری از هم ماتریس Q یک ماتریس $(3N-2)\times(3N-2)$ است که برابر است با

$$\begin{aligned} diag(Q) = [&\sigma^2_{\tau_{21}} \quad \cdots \quad \sigma^2_{\tau_{N1}} \\ &\sigma^2_{g_{21}} \quad \cdots \quad \sigma^2_{g_{N1}} \; \sigma^2_{\theta_1} \quad \cdots \quad \sigma^2_{\theta_N}] \end{aligned} \tag{۹}$$

۳- تخمینگر مکان با استفاده از اندازه‌گیری های توام

در این بخش تخمینگر WLS برای تخمین مکان با استفاده از اندازه‌گیری های TDOA، AOA و GROA را ارائه می دهیم. تخمینگر ارائه شده را با توسعه تخمینگر [۲۵] و افزایش AOA به ان بدست می اوریم. برخلاف معادلات ارائه شده در [۲۵] که معادلات WLS به مقادیر واقعی وابسته بودند معادلات را بر حسب مقادیر اندازه‌گیری شده گسترش می دهیم.

۳-۱- تخمینگر WLS

با قرار داردن $\gamma = 1$ در معادله (۲) معادلات خطی زیر را ارائه می دهیم.

$$\begin{aligned} &(c\hat{\tau}_{i1})^2 - \underline{p}_i^T \underline{p}_i + \underline{p}_1^T \underline{p}_1 \\ &+2(\underline{p}_i - \underline{p}_1)^T \underline{p}_t + 2c\hat{\tau}_{i1} r_1 = e_{\tau_{i1}} \\ &c\hat{\tau}_{i1} - r_1(\hat{g}_{i1} - 1) = e_{g_{i1}} \\ &(\underline{y}^T \cos(\hat{\theta}_i) - \underline{x}^T \sin(\hat{\theta}_i))(\underline{p}_i - \underline{p}_t) = e_{\theta_i} \end{aligned} \tag{۱۰}$$

که $e_{\tau_{i1}} = 2cr_i n_{\tau_{i1}}$، $e_{g_{i1}} = cn_{\tau_{i1}} - r_1 n_{g_{i1}}$ و $e_{\theta_i} = r_i n_{\theta_i}$ هستند. با توسعه معادلات بالا برای تمامی سنسورها و ارائه آن به فرم ماتریسی خواهیم داشت

$$\underline{e} = H\underline{n} = \underline{b} - G\begin{pmatrix} \underline{p}_t \\ r_1 \end{pmatrix} \tag{۱۱}$$

ماتریس های G، H و بردار $\underline{b}$ در (۱۲) ارائه شده اند. برای حل معادله فوق و یافتن مجهولات طبق حل WLS داریم

$$\Rightarrow \underline{\psi}_1 = \begin{pmatrix} \tilde{\underline{p}}_t \\ \tilde{r}_1 \end{pmatrix} = (G_1^T W_1 G_1)^{-1} G_1^T W_1 \underline{b} \tag{۱۳}$$

در معادله فوق G_1، $\underline{b}$ همان G و $\underline{b}$ در (۱۲) است. W_1 برابر است با $W_1 = (HQH^T)^{-1}$ که H در (۱۲) ارائه شده است و Q ماتریس کواریانس اندازه‌گیری ها است. با فرض استقلال اندازه‌گیری ها، ماتریس Q برابر است.

$$\begin{aligned} Q = diag[&\sigma^2_{\tau_{21}} \quad \cdots \quad \sigma^2_{\tau_{N1}} \quad \sigma^2_{g_{21}} \quad \cdots \\ &\sigma^2_{g_{N1}} \quad \sigma^2_{\theta_1} \quad \cdots \quad \sigma^2_{\theta_N}] \end{aligned} \tag{۱۴}$$

از تخمینگر دو مرحله ای ارائه شده در [۲۵] و توسعه آن برای تخمین با تلفیق اطلاعات TDOA، GROA و AOA استفاده می کنیم.

$$\underline{b} = \begin{pmatrix} (c\hat{\tau}_{21})^2 - \underline{p}_2^T \underline{p}_2 + \underline{p}_1^T \underline{p}_1 \\ \vdots \\ (c\hat{\tau}_{N1})^2 - \underline{p}_N^T \underline{p}_N + \underline{p}_1^T \underline{p}_1 \\ c\hat{\tau}_{21} \\ \vdots \\ c\hat{\tau}_{N1} \\ y_1 \cos(\hat{\theta}_1) - x_1 \sin(\hat{\theta}_1) \\ \vdots \\ y_N \cos(\hat{\theta}_N) - x_N \sin(\hat{\theta}_N) \end{pmatrix} \quad G = \begin{pmatrix} -2(x_2 - x_1) & -2(y_2 - y_1) & -2c\hat{\tau}_{21} \\ & \vdots & \\ -2(x_N - x_1) & -2(y_N - y_1) & -2c\hat{\tau}_{21} \\ 0 & 0 & \hat{g}_{21} - 1 \\ & \vdots & \\ 0 & 0 & \hat{g}_{N1} - 1 \\ -\sin(\hat{\theta}_1) & \cos(\hat{\theta}_1) & 0 \\ & \vdots & \\ -\sin(\hat{\theta}_N) & \cos(\hat{\theta}_N) & 0 \end{pmatrix}$$

$$H = \begin{pmatrix} 2cr_2 & \cdots & 0 & & & & & & \\ \vdots & \ddots & \vdots & & 0 & & & 0 & \\ 0 & \cdots & 2cr_N & & & & & & \\ c & \cdots & 0 & -r_1 & \cdots & 0 & & & \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & & 0 & \\ 0 & \cdots & c & 0 & \cdots & -r_1 & & & \\ & & & & & & r_1 & \cdots & 0 \\ & 0 & & & 0 & & \vdots & \ddots & \vdots \\ & & & & & & 0 & \cdots & r_M \end{pmatrix} \tag{۱۲}$$

جدول (۱): موقعیت سنسورها

موقعیت سنسور	۱	۲	۳	۴
x	0 km	10 km	-10 km	0 km
y	0 km	0 km	0 km	10 km

جدول (۲): موقعیت هدف

موقعیت هدف	دورن محدوده	محدوده نزدیک	محدوده دور
x	5 km	5 km	5 km
y	5 km	25 km	100 km

مرحله اول این تخمینگر به صورت معادله (۱۳) انجام شده و مرحله دوم طبق رابطه ذیل انجام می شود. در این معادله از تخمین دقیق پارامتر $\underline{\psi}_2$ که اختلاف $\underline{p}_t$ با $\underline{p}_1$ با درایه های به توان ۲ را نشان می دهد، برای تخمین $\hat{\underline{p}}_t$ متناسب با $\underline{p}_1$ استفاده می شود.

$$\hat{\underline{p}}_t = U\sqrt{\underline{\psi}_2} + \underline{p}_1 \qquad (۱۵)$$

در معادله فوق $\hat{\underline{p}}_t$ تخمین مکان هدف بوده و $\sqrt{\underline{\psi}_2}$ مجذور درایه های بردار $\underline{\psi}_2$ را نشان می دهد. $\underline{\psi}_2$ با استفاده از تخمین WLS با کمک مجهولات محاسبه شده در $\underline{\psi}_1$ محاسبه می شود. U و $\underline{\psi}_2$ برابرند با

$$U = diag(sign(\tilde{\underline{p}}_t - \underline{p}_1))$$
$$\underline{\psi}_2 = \left[\left(\hat{\underline{p}}_t - \underline{p}_1\right)\odot\left(\hat{\underline{p}}_t - \underline{p}_1\right)\right] = (G_2^T W_2 G_2)^{-1} G_2^T W_2 \underline{b}_2 \qquad (۱۶)$$

که $\odot$ به معنای ضرب داخلی عناصر و مقادیر پارامتر های $\underline{b}_2$، G_2 و W_2 برابراند با

$$\underline{b}_2 = \begin{pmatrix} \left(\tilde{\underline{p}}_t - \underline{p}_1\right)\odot\left(\tilde{\underline{p}}_t - \underline{p}_1\right) \\ \tilde{r}_1 \end{pmatrix}$$
$$G_2 = \begin{pmatrix} I_M \\ 1 \quad 1 \quad 1 \end{pmatrix} \qquad (۱۷)$$
$$W_2 = H_2^{-1}(G_1^T W_1 G_1) H_2^{-1}$$

که $H_2 = 2diag([\tilde{\underline{p}}_t - \underline{p}_1]^T \quad \tilde{r}_1)$ است.

انجام مرحله دوم تخمین موجب بهبود تخمین مکان هدف با استفاده از اطلاعات برد تخمین زده می شود. واریانس تخمینگر ارائه شده برابر است با

$$Cov(\hat{\underline{p}}_t) = B_3^{-1} Cov(\underline{\psi}_2) B_3^{-1} \qquad (۱۸)$$

که $Cov(\underline{\psi}_2)$ و B_3 در معادله فوق برابر هستند با

$$Cov(\underline{\psi}_2) = (G_2^T W_2 G_2)^{-1}$$
$$B_3 = 2diag[\underline{p}_t - \underline{p}_1] \qquad (۱۹)$$

اگر از همان مرحله اول جهت تخمین مکان هدف بدون انجام مرحله دوم استفاده کنیم کواریانس تخمین برابر است با

$$Cov(\underline{\psi}_1) = (G_1^T W_1 G_1)^{-1} \qquad (۲۰)$$

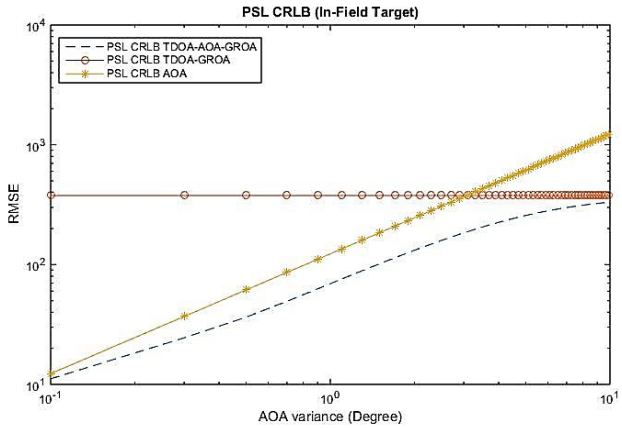
۳-۲- پیچیدگی محاسباتی

افزایش GROA و AOA به TDOA باعث افزایش پیچیدگی محاسباتی تخمین مکان می گردد. این پیچیدگی در مرحله اول تخمین خود را نشان می دهد. در صورت استفاده تنها از TDOA ماتریس های مربعی G و H و بردار b دارای ابعاد N-1 هستند. افزایش GROA و AOA ابعاد این پارامترها را به ترتیب به مقدار N-1 و N افزایش می دهد. اگر مرتبه ماتریس را M در نظر بگیریم با توجه به وجود ۵ ضرب و یک معکوس ماتریس با مرتبه M و در نظر گرفتن پیچیدگی ضرب ماتریسی و معکوس از مرتبه $O(M^3)$ می توان در نظر گرفت که این پیچیدگی با افزایش مرتبه ماتریس ها به دلیل افزایش اندازه‌گیری های GROA و AOA از مرتبه $O(M^3)$ افزایش می یابد.

در مرحله دوم تخمین به دلیل استفاده از $\tilde{\underline{p}}_t$ و $\tilde{r}_1$ پیچیدگی محاسباتی تخمینگر بدون تغییر می ماند. البته خود محاسبه اندازه‌گیری های GROA و AOA در سنسورها دارای پیچیدگی محاسباتی بوده و حجم پردازش های مورد نیاز در یک سنسور را نسبت به استفاده تنها از TDOA افزایش می دهد.

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش به ارائه نتایج شبیه سازی الگوریتم ها خواهیم پرداخت. مقدار RMSE (Root Mean Square Error) تخمینگر در دو حالت تنها با مرحله اول و با مرحله دوم در مقایسه با CRLB ارائه می شود. جهت بررسی گین افزایش AOA به TDOA و GROA نمودارهای مقایسه ای با نتایج استفاده تنها از TDOA و GROA [25] ارائه می شود. نمودارهای شبیه سازی با متوسط گیری ۱۰۰۰ مرتبه نتایج اجرای مستقل بدست آمده اند. مکان سنسورها در جدول (۱) ارائه شده است. برای بررسی کارایی الگوریتم ها ۳ مکان مختلف هدف در نظر می گیریم که این مکان ها برای اهداف درون محدوده، محدوده نزدیک و محدوده دور در جدول (۲) ارائه شده است. انحراف معیار خطای اندازه‌گیری های TDOA و GROA به ترتیب برابر 100ns و -15dB در نظر گرفته شده است. نمودارها به ازای تغییرات انحراف معیار خطای AOA بین 0.1 درجه الی 10 درجه رسم شده اند تا کارایی الگوریتم ارائه شده به ازای دقت های متفاوت AOA در الگوریتم تلفیقی نشان داده شود.

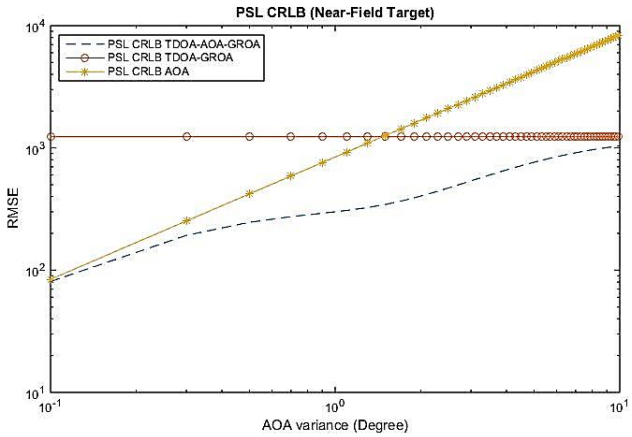


شکل (۲): باند پایین RMSR برای مکانیابی هدف درون محدوده سنسورها به ازای تغییرات دقت AOA برای استفاده از TDOA و GROA، استفاده از AOA و استفاده از TDOA، GROA و AOA

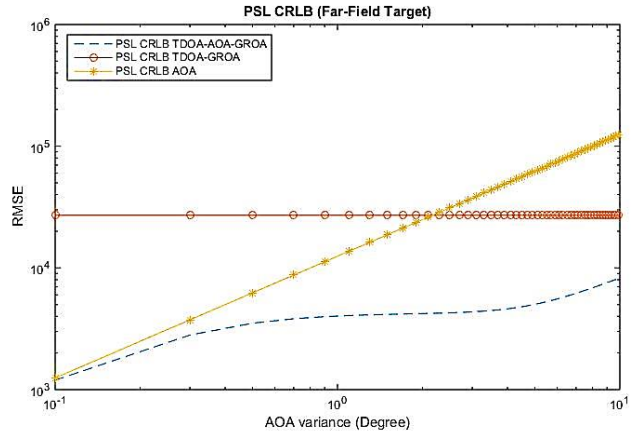
دو دسته نمودار ارائه شده است. در نمودار های ارائه شده در شکل های (۲)، (۳) و (۴) باند پایین تخمین ارائه شده در بخش مدل سازی به ازای مکان های مختلف هدف و تغییرات دقت AOA نشان داده شده است. در دسته دوم نمودار های ارائه شده در شکل های (۵)، (۶) و (۷) خطای تخمینگر در مقایسه با باند پایین تخمین نشان داده شده است. دسته اول گین افزایش AOA و استفاده از الگوریتم تلفیقی را نشان داده و دسته دوم امکان رسیدن به این کارایی توسط الگوریتم تخمینگر ارائه شده را اثبات می کند.

نمودارهای های نمایش داده شده در شکل های (۲)، (۳) و (۴) مقدار RMSE برای باند پایین تخمین (CRLB) را برای حالتی های استفاده از اندازه‌گیری های TDOA و GROA، اندازه گیری های AOA و اندازه‌گیری های TDOA، GROA و AOA تلفیقی به ازای تغییر دقت AOA را نشان می دهند. در این اشکال دقت AOA متغیر بین ۰,۱ درجه الی ۱۰ درجه در نظر گرفته شده است. شکل های (۲)، (۳) و (۴) به ترتیب نتایج برای حالت هدف دورن محدوده، محدوده نزدیک و محدوده دور را نشان می دهند. که مکان سنسور ها و مکان هدف در این محدوده ها طبق جدول (۱) و (۲) در نظر گرفته شده است. در این شکل ها چون الگوریتم TDOA و GROA وابستگی به تغییرات AOA ندارد همواره ثابت است.

در شکل (۲) که باند پایین خطای تخمین RMSE برای هدف درون محدوده سنسورها را نشان می دهد خطای الگوریتم TDOA و GROA برابر ۳۸۰ متر خطای الگوریتم AOA بین ۱۲ متر الی ۱۲۰۰ متر و الگوریتم تلفیق AOA و TDOA و GROA بین ۱۱ متر الی ۳۳۰ متر است. این اعداد برای هدف در محدوده نزدیک که در شکل (۳) نشان داده شده است برابر ۱۲۳۰ متر برای الگوریتم TDOA و GROA، ۸۴ متر الی ۸۳۳۰ متر برای الگوریتم AOA و ۸۰ متر الی ۱۰۳۰ متر برای الگوریتم تلفیق AOA و TDOA و GROA است. این اعداد برای هدف در محدوده دور که در شکل (۴) نشان داده شده



شکل (۳): باند پایین RMSR برای مکانیابی هدف در محدوده نزدیک به سنسورها به ازای تغییرات دقت AOA برای استفاده از TDOA و GROA، استفاده از AOA و استفاده از TDOA، GROA و AOA

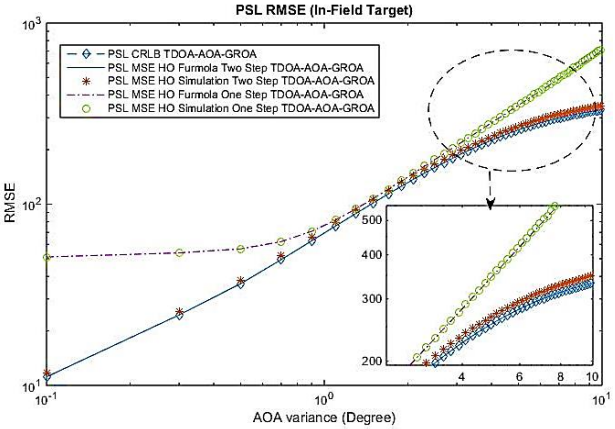


شکل (۴): باند پایین RMSR برای مکانیابی هدف محدوده دور از سنسورها به ازای تغییرات دقت AOA برای استفاده از TDOA و GROA، استفاده از AOA و استفاده از TDOA، GROA و AOA.

است برابر ۲۷۷۰۰ متر برای الگوریتم TDOA و GROA، ۱۲۵۰ متر الی ۱۲۳۰۰۰ متر برای الگوریتم AOA و ۱۲۰۰ متر الی ۸۲۰۰ متر برای الگوریتم تلفیق AOA و TDOA و GROA است.

همانطور که مشهود است با افزایش AOA به اندازه‌گیری های TDOA و GROA باند پایین تخمین بهبود می یابد. در حالتی که دقت AOA و TDOA به همراه GROA در حدی است که خطای تخمین برابر ایجاد می کنند، بهبود الگوریتم تلفیقی AOA در کنار اندازه‌گیری های TDOA و GROA مشهود تر است. در حالتی که دقت هر کدام از الگوریتم های AOA یا TDOA و GROA خطای بهتری ایجاد کند کارایی الگوریتم تلفیقی به الگوریتم با استفاده از آن اندازگیری نزدیک است ولیکن از آن بهتر خواهد بود. این حالت در قسمت های ابتدایی شکل های (۲)، (۳) و (۴) مشهود است. در این قسمت ها به دلیل خطای بسیار بهتر AOA نسبت به TDOA و

GROA نتایج استفاده توام از سه اندازه‌گیری به AOA بسیار نزدیک است.



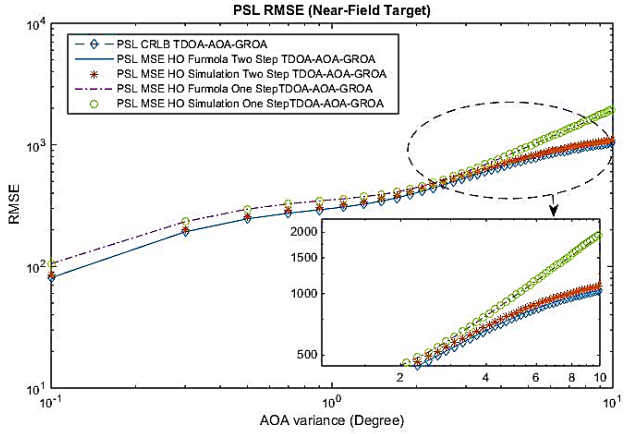
شکل (۵): RMSR خطای تئوری و شبیه سازی تخمینگر برای مکانیابی هدف درون محدوده سنسورها به ازای تغییرات دقت AOA

نتایج نشان می دهند الگوریتم تلفیقی AOA در کنار اندازه‌گیری های TDOA و GROA همواره باعث بهبود کارایی مکانیابی خواهد شد. در شکل های (۵)، (۶) و (۷) RMSE تخمینگر به ازای تغییرات واریانس تخمین AOA در حالت استفاده از تخمین تک مرحلهای و استفاده از تخمین دو مرحله ای نشان داده شده است. RMSE مبتنی بر فرمول های (۱۸) و (۲۰) و همچنین شبیه سازی با متوسط گیری از ۱۰۰۰ با اجرای مستقل الگوریتم نشان داده شده است. در این شکل ها محدوده گذر باند پایین خطای استفاده از اندازه‌گیری های AOA از خطای استفاده از اندازه‌گیری هایTDOA و GROA به صورت بزرگنمایی در هر شکل نشان داده شده است.

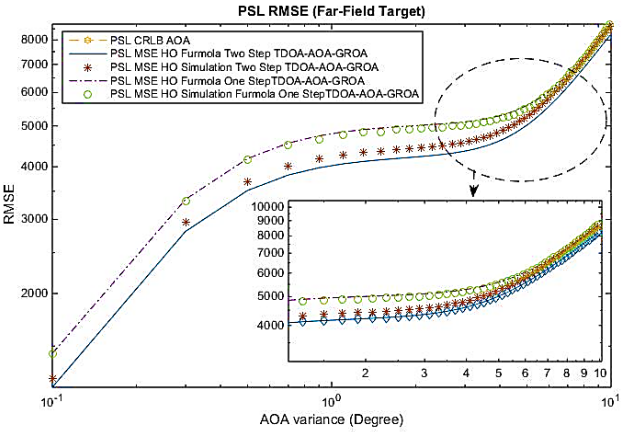
همانطور که مشهود است در هر دو حالت استفاده و عدم استفاده از مرحله دوم خطای شبیه سازی و فرمول تقریبا برابر هستند. یعنی فرمول ارائه شده برای خطای تخمینگر به خوبی خطای واقعی آن را نشان می دهد. همانطور که در نمودارها نشان داده شده است در حالت استفاده از مرحله دوم تخمین، خطای تخمینگر تقریبا برابر باند CRLB است. یعنی برای رسیدن به باند پایین خطا باید از مرحله دوم تخمین استفاده کرد. این مطلب در بزرگنمایی انجام شده در هر شکل مشهود تر است. این نمودارها به خوبی نشان می دهند که نتنها به صورت تئوری افزایش اندازه‌گیری های AOA به اندازه‌گیری های TDOA و GROA باعث بهبود باند پایین خطای تخمین می شود بلکه با الگوریتم تخمینگر ارائه شده می توان به این باند دست یافت.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش مکانیابی غیرفعال منبع با استفاده از تکنیک توام اندازه‌گیری های TDOA، GROA و AOA برای چندین سنسور ارائه شد. به منظور بررسی کارآیی این تخمینگر کرانه پایین خطا در مکانیابی در مقایسه با روش های قبلی اندازه‌گیری ها و خطای تئوری و اندازه گیری به عنوان معیار گرفته شده است.



شکل (۶): RMSR خطای تئوری و شبیه سازی تخمینگر برای مکانیابی هدف در محدوده نزدیک سنسورها به ازای تغییرات دقت AOA



شکل (۷): RMSR خطای تئوری و شبیه سازی تخمینگر برای مکانیابی هدف در محدوده دور از سنسورها به ازای تغییرات دقت AOA

همانطور که در بررسی باند پایین تخمین نشان داده شد، افزایش AOA به اندازه‌گیری های TDOA و GROA و استفاده توام از آنها باعث بهبود تخمین مکان هدف می شود. همچنین نشان داده شد تخمینگر پیشنهادی, در دو مرحله قادر به رسیدن به کرانه پایین تخمین است. همانطور که در بخش شبیه سازی نشان داده شد، بهبود دقت مکانیابی توام با این اندازه‌گیری ها در تمامی حالات هدف درون محدوده سنسورها در شکل (۲)، هدف نزدیک محدوده سنسورها در شکل (۳) و هدف دور از محدوده سنسور ها در شکل (۴) وجود دارد. همچنین همانطور که در شکل های (۵)، (۶) و (۷) نشان داده شده است تخمینگر در تمامی این حالات کارایی تقریبا برابر با باند پایین تخمین ارائه شده دارد. همانطور که خطای ارائه شده تخمینگر هم بصورت تئوری و هم به صورت شبیه سازی موید این نتایج است و برابر باند پایین تخمین است.

افـزایش AOA بـه انـدازه‌گیـری هـای TDOA و GROA افـزایش پیچیدگی محاسباتی و تغییرات در سـاختار سنسـورها را در پـی دارد. لیکن با توجه به اهمیت مکانیابی غیرفعال فرستنده ناشـناس پرداخـت این هزینه در مقابل بهبودی که حاصل می شود قابل توجیـه اسـت. در این روش، سنسورهایی با قابلیت مکانیابی انواع سیگنال ها با دقت های متفاوت اندازه‌گیری های TDOA، GROA و AOA را لازم می دارد.

مراجع

[1] R. J. Vaccaro, "The past, present, and the future of underwater acousticsignal processing," IEEE Signal Process. Mag., vol. 15, no. 4, pp. 21–51, Jul. 1998.

[2] A. Caiti, A. Garulli, F. Livide, and D. Prattichizzo, "Localization of autonomous underwater vehicles by floating acoustic buoys: A set-membership approach," IEEE J. Ocean. Eng., vol. 30, no. 1, pp. 140–152, Jan. 2005.

[3] M. Ahmadi, K. Mohamedpour, "Pulse Repetition Interval Modulation Type Recognition", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol.6-No.2- Fall & Winter 2009.

[4] M. Alae, H. Amindavar, "A New Method in Moving Target Recognition Using Ground Surveillance Pulse Doppler RADARs", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers. Vol.6- No.2- Fall & Winter 2009.

[5] T. S. Rappaport, J. H. Reed, and B. D. Woerner, "Position location using wireless communications on highways of the future," IEEE Commun. Mag., vol. 34, no. 10, pp. 33–41, Oct. 1996.

[6] A. H. Sayed, A. Tarighat, and N. Khajehnouri, "Network-based wireless location: Challenges faced in developing techniques for accurate wireless location information," IEEE Signal Process. Mag., vol. 22, no. 4, pp. 24–40, Jul. 2005.

[7] B. Mungamuru and P. Aarabi, "Enhanced sound localization," IEEE Trans. Syst., Man., Cybern., vol. 34, no. 3, pt. B, pp. 1526–1540, Jun. 2004.

[8] N. Patwari, J. N. Ash, S. Kyperountas, A. O. Hero, R. L. Moses, and N. S. Correal, "Locating the nodes: Cooperative localization in wireless sensor networks," IEEE Signal Process. Mag., vol. 22, no. 4, pp. 54–69, Jul. 2005.

[9] S. Gezici, Z. Tian, G. B. Giannakis, H. Kobayashi, A. F. Molisch, H. V. Poor, and Z. Sahinoglu, "Localization via ultra-wideband radios: A look at positioning aspects for future sensor networks," IEEE Signal Process. Mag., vol. 22, no. 4, pp. 70–84, Jul. 2005.

[10] Y. T. Chan and K. C. Ho, "A simple and efficient estimator for hyperbolic location," IEEE Trans. Signal Process., vol. 42, no. 8, pp. 1905–1915, Aug. 1994.

[11] G. C. Carter, Coherence and Time Delay Estimation. New York: IEEE, 1993.

[12] Yue Wang ; K. C. Ho, "TDOA Source Localization in the Presence of Synchronization Clock Bias and Sensor Position Errors", IEEE Signal Processing Society, vol. 61, Sept.15, 2013.

[13] Yang Liu, Fucheng Guo, Le Yang, Wenli Jiang, "An Improved Algebraic Solution for TDOA Localization With Sensor Position Errors", IEEE Communications Letters, vol. 19, Dec. 2015.

[14] B. Yegnanarayana, S. R. M. Prasanna, R. Duraiswami, and D. Zotkin, "Processing of reverberant speech for time-delay estimation," IEEE Trans. Speech, Audio Process., vol. 13, no. 6, pp. 1110–1118, Nov. 2005.

[15] K. C. Ho and Y. T. Chan, "Geolocation of a known altitude object from TDOA and FDOA measurements," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 33, no. 3, pp. 770–783, Jul. 1997.

[16] K. C. Ho and W. Xu, "An accurate algebraic solution for moving source location using TDOA and FDOA measurements," IEEE Trans. Signal Process., vol. 52, no. 9, pp. 2453–2463, Sep. 2004.

[17] X. Sheng and Y. H. Hu, "Maximum likelihood multiple-source localization using acoustic energy measurements with wireless sensor networks," IEEE Trans. Signal Process., vol. 53, no. 1, pp. 44–53, Jan. 2005.

[18] D. Blatt and A. D. Hero, III, "Energy-based sensor network source localization via projection onto convex sets," IEEE Trans. Signal Process., vol. 54, no. 9, pp. 3614–3619, Sep. 2006.

[19] S. T. Birchfield and R. Gangishetty, "Acoustic localization by interaural level difference," in Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Process., Mar. 2005, pp. iv/1109–iv/1112.

[20] A. Pages-Zamora, J. Vidal, and D. H. Brooks, "Closed-form solution for positioning based on angle of arrival measurements," in Proc. Int. Symp. Pers., Indoor, Mobile Radio Commun., Sep. 2002, pp. 1522–1526.

[21] Benjian Hao, Zan Li, Yunmei Ren, Weiyi Yin, "On the Cramer-Rao bound of multiple sources localization using RDOAs and GROAs in the presence of sensor location uncertainties", 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), June 2012.

[22] Benjian Hao, Zan Li , Jiangbo Si , Weiyi Yin , Yunmei Ren,"Passive multiple disjoint sources localization using TDOAs and GROAs in the presence of sensor location uncertainties", Communications (ICC), 2012 IEEE International Conference on , June 2012.

[23] Jihao Yin, Qun Wan, Shiwen Yang, Senior Member, IEEE, and K. C. Ho, Fellow, IEEE, "A Simple and Accurate TDOA-AOA Localization Method Using Two Stations", IEEE SIGNAL PROCESSING LETTERS, vol. 23, no. 1, January 2016.

[24] W. Cui, Z. Cao, and J.Wei, "Dual-microphone source location method in 2-D space," in Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Process., May 2006, pp. iv/845–iv/848.

[25] S. K. C. Ho and Ming Sun, "Passive Source Localization Using Time Differences of Arrival and Gain Ratios of Arrival," IEEE Trans. Signal Process., vol. 56, pp. 464-477,Feb. 2008.

[26] S. Fooladi Talari, K. Mohamedpour, "Sensors and Target Geometry Effects on Passive Source Localization Using Joint Time Deference of Arrival & Gain Ratio of Arrival Measurements", 25th Iranian Conference on Electrical Engineering, ICEE2017 ,2017.

[27] Jihao Yin, Qun Wan, Shiwen Yang, Senior Member, IEEE, and K. C. Ho, Fellow, IEEE, "A Simple and Accurate TDOA-AOA Localization Method Using Two Stations", IEEE SIGNAL PROCESSING LETTERS, vol. 23, no. 1, January 2016.

[28] Norouzi, Y., and M. Derakhshani. "Joint time difference of arrival/angle of arrival position finding in passive radar." IET radar, sonar & navigation 3.2 (2009): 167-176.

[29] J. Yang, G. Cui, X. Yu, S. Lu, L. Kong, "Passive location for coherent near-field sources with non-uniform sparse linear array", 2017 IEEE Radar Conference (RadarConf), 2017.

[30] A. A. Ebrahimi, H. R. Abutalebi, M. Karimi, "Localisation of mixed near-field and far-field sources using the largest aperture sparse linear array", IET Signal Processing, Vol. 12. Pages: 155 - 162, 2018.