

## به روز رسانی ناوبری با استفاده از روش زاویه سنجی غیر فعال

یاسر نوروزی<sup>۱\*</sup>، ناهید بیات<sup>۲</sup>

۱- استادیار، ۲- کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت: ۹۵/۰۸/۰۷؛ پذیرش: ۹۵/۱۱/۰۳)

### چکیده

امروزه ناوبری (مسیریابی) و تعیین موقعیت مکانی دقیق و مورد اعتماد برای اجسام سیار، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. به این منظور، برای ناوبری الگوریتم‌های گوناگونی ارائه شده است که می‌توان آن‌ها را به دو دسته عمده فعال و غیرفعال تقسیم کرد. روش‌های غیرفعال عموماً مبتنی بر حسگرهای ناوبری اینرسی (INS) هستند و خطای آن‌ها در طول زمان افزایش می‌یابد. روش‌های فعال (مبتنی بر GPS، Loran یا ...) مشکل افزایش خطا در طول زمان را ندارند ولی به علت آسیب‌پذیری در مقابل تداخل‌های عمدی و غیرعمدی برای برخی از کاربردها مناسب نیستند. در این مقاله ما یک روش ناوبری با استفاده از اندازه‌گیری زاویه ورود سیگنال‌های دریافتی از تابش‌گرها (رادارها) ارائه کرده‌ایم. نشان داده می‌شود که در این روش برخلاف روش‌های مبتنی بر ناوبری اینرسی، خطا در طول زمان افزایش نمی‌یابد و حتی در مواردی بهتر نیز می‌شود.

### واژگان کلیدی

ناوبری، زاویه ورود، تخمین، پردازش آرایه‌ای، ردیابی، سامانه غیرفعال

#### ۱- مقدمه

به دست می‌آید. در واقع محل هدف از زاویه تشکیل شده از تقاطع خطوط جهت‌دار به دست می‌آید. این تخمین با اندازه‌گیری زاویه ورودی از مبدأ به مقصد موقعیت را برآورد می‌نماید [۱].

استخراج حالت و اطلاعات حرکتی هدف نظیر مکان، سرعت، شتاب و مسیر با سنجش جهت هدف توسط حسگر فیلتر نامیده می‌شود. فیلتر از دو مرحله پیش‌بینی و به‌روزرسانی تشکیل شده است. در سال ۱۹۶۰ کالمن، فیلتری برای پیش‌بینی و تخمین، طراحی و منتشر کرد. در این فیلتر از یک تقریب گسسته خطی برای تخمین حالت استفاده می‌شد [۲]. فیلتر کالمن به‌عنوان یک الگوریتم بازگشتی بهینه با محاسبه دقیق متغیرهای حالت تحت شرایط نویزی مشخص می‌شود [۳-۴]. در این مقاله در بخش اول ردیابی زاویه جهت‌ی هدف مورد بررسی قرار گرفته و در بخش دوم الگوریتم فیلتر کالمن غیرخطی توصیف شده و در بخش سوم مسئله ناوبری با روش زاویه ورود در حالت‌های مختلف پیاده‌سازی و شبیه‌سازی شده و نتایج ارائه می‌شود. در بخش نهایی نیز هدف از ارائه مقاله به‌طور خلاصه بیان می‌شود.

#### ۲- ردیابی به کمک زاویه سنجی

مکان‌یابی اهداف به دو صورت فعال و غیرفعال امکان‌پذیر می‌باشد. در روش فعال، رادار با ارسال پرتو در محیط و بررسی پرتو بازگشتی، حضور اشیا متحرک را درک می‌نماید. در این روش با

به‌کارگیری سامانه‌های دقیق مسیریابی و پیش‌بینی موقعیت هدف یکی از نیازهای مهم مورد توجه در کاربردهای متفاوت نظامی و غیرنظامی مانند کنترل هوشمند، رباتیک، کنترل آتش و سیستم‌های مراقبتی است. یک سیستم ناوبری با اندازه‌گیری مختصات هدف اطلاعاتی را فراهم می‌آورد که به‌وسیله این اطلاعات می‌توان مسیر و موقعیت بعدی هدف را پیش‌بینی کرد.

این سیستم‌ها به‌طور مداوم موقعیت نسبی هدف را در فاصله، زاویه و ارتفاع مشخص می‌نمایند. اطلاعات مربوط به زاویه، ارتفاع و فاصله از حسگرهای اندازه‌گیری زاویه و ارتفاع به دست می‌آید. در مسئله ناوبری موقعیت هدف تنها در لحظه نخست  $X_0$  موجود است و پس از آن، متغیرهای حالت را باید توسط داده‌های خطادار اندازه‌گیری (زاویه و فاصله)، برآورد کرد. به‌عبارت دیگر، اگر اندازه‌گیری فاصله و زاویه در دسترس باشد، مسئله به‌راحتی حل می‌شود. ولی در شرایط پس‌پس امکان دریافت داده‌های فاصله وجود ندارد و تنها داده‌های زاویه قابل دریافت هستند. در این حسگرها برای تخمین مسیر حرکت هدف اطلاعات از زاویه حرکت اهداف نسبت به حسگرهای مشاهده در حال حرکت

بردار فاصله با زوایای جهت  $(\phi)$  و ارتفاعی  $(\gamma)$  متناسب با شکل (۱) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$r^{Target} = r \begin{bmatrix} \cos \gamma \sin \phi \\ \cos \gamma \cos \phi \\ \sin \gamma \end{bmatrix} \quad (۵)$$

در این صورت دینامیک هدف خطی بوده و مدل فضای حالت به صورت معادله زیر مدل می‌گردد [۴-۵]:

$$X_k = FX_{k-1} + w_{k-1} \quad (۶)$$

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۷)$$

که F ماتریس تبدیل حالت و  $w_{k-1}$  بردار نویز به علت اغتشاشاتی است که در حرکت به وجود می‌آید. این اغتشاشات از نوع نیرو هستند. پس به سیستم یک شتاب نویزی می‌دهند و مؤلفه‌های سرعت را تغییر می‌دهند. در ماتریس تبدیل حالت F برای فاصله زمان  $[t_{k-1}, t_k]$  داریم [۶]:

$$\delta t = t_{k-1} - t_k \quad (۸)$$

و نویز سیستم، یک نویز گوسی با میانگین صفر و کوواریانس  $Q_k$  تعریف می‌شود:

$$w_{k-1} \sim N(0, Q_{k-1}) \quad (۹)$$

که کوواریانس  $Q_{k-1}$  دارای چگالی طیف توان گسسته زیر است [۷]:

$$Q_C = \text{diag}(0, 0, 0, q_1, q_2, q_3) \quad (۱۰)$$

## ۲-۱- مدل مشاهدات

مدل مشاهدات بیشتر بر فیزیک و شرایط واقعی و هندسه استوار است. گاهی به این مدل‌ها مدل حسگر نیز می‌گویند. حسگرهای مشاهده، ارتفاع و زاویه هدف را در زمان‌های گسسته  $t_k$  مشخص می‌کنند. مدل مشاهده به صورت رابطه زیر مدل می‌گردد:

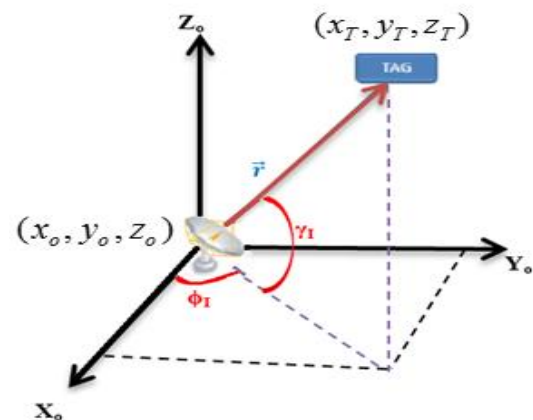
$$Z_k = HX_k + R_k \quad (۱۱)$$

که در این جا:

داشتن زاویه و فاصله مسئله به راحتی حل می‌شود. در روش غیرفعال و سامانه‌های غیرفعال به دلیل محرمانگی و یا نداشتن فاصله مکان‌یابی با بررسی سیگنال‌های ساطع شده از هدف انجام می‌شود. در این مقاله تمرکز اصلی بر مکان‌یابی غیرفعال است. یکی از روش‌های مکان‌یابی بر اساس زاویه دریافتی سیگنال است.

مسئله اصلی به روزرسانی ناوبری تخمین مسیر حرکت هدف از داده‌های نویزدار است. در ناوبری هدف، حسگرها زاویه هدف را نسبت به نقاط هدف تعیین می‌کنند. در حالت سه بعدی با در اختیار داشتن موقعیت هدف (حقیقی و خطادار)، دو حسگر زاویه و یک حسگر ارتفاع و معادلات فضای حالت و بردار، مشاهده مسیر حرکت هدف تخمین زده می‌شود. مدل فضای حالت با متغیرهای حالت در زمان گسسته k شامل موقعیت در مختصات دکارتی  $x, y, z$  و سرعت  $v_x, v_y, v_z$  در نظر می‌گیریم.

در شکل (۱) مدل فضای حالت با متغیرهای حالت در زمان گسسته قابل مشاهده است:



شکل (۱). تعریف مختصات ردیاب زاویه جهتی و ارتفاعی هدف

بردار حالت هدف و حسگر مشاهده را به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$X_{Target} = [x \ y \ z \ v_x \ v_y \ v_z]^T \quad (۱)$$

و

$$X_{Observer} = [x_o \ y_o \ z_o \ v_{x_o} \ v_{y_o} \ v_{z_o}]^T \quad (۲)$$

بردار فاصله متناسب با هدف و حسگر مشاهده در مختصات دکارتی را به صورت زیر تعریف می‌نماییم:

بردار فاصله هدف تا نقطه مشاهده:  $r^{Target}$

$$r^{Target} = [x - x_o \ y - y_o \ z - z_o]^T \quad (۳)$$

که اندازه بردار فاصله هدف تا نقطه مشاهده برابر است با:

$$r^{Target} = \sqrt{(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2 + (z - z_o)^2} \quad (۴)$$

$$N(x; m, P) = |2\pi P|^{-\frac{1}{2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(x-m)^T P^{-1}(x-m)\right\} \quad (۱۹)$$

تابع احتمال گوسی با دو پارامتر متوسط و کوواریانس تعریف می‌شود؛ بنابراین، با فرض گوسی بودن توابع احتمالات در فیلتر کالمن، کافی است که پارامترهای مربوط را به دست آورد.

در روش تقریب تحلیلی توابع غیرخطی، مهم‌ترین روش فیلتر EKF است که با استفاده از قاعده تیلور، معادلات غیرخطی را به صورت محلی، بسط داده و خطی می‌نماید. اکثر عبارات بسط تیلور حذف می‌گردد. به لحاظ سادگی محاسبات، پس از خطی‌سازی معادلات تقریب‌هایی در ماتریس‌های  $\hat{H}_k$  و  $\hat{F}_{k-1}$  با بسط تیلور ایجاد می‌نماید که به طور خلاصه در زیر ارائه می‌گردد:

تخمین اولیه بردار متغیر حالت

$$m_k^- = f(m_{k-1}, k-1)$$

تخمین اولیه ماتریس کوواریانس متغیرهای حالت

$$P_k^- = F_x(m_{k-1}, k-1) P_{k-1} F_x^T + Q_{k-1}$$

استفاده از اندازه‌گیری ( $y = Measurement$ )

$$v_k = y_k - h(m_k^-, k)$$

$$S_k = H_x(m_k^-, k) P_k^- H_x^T(m_k^-, k) + R_k$$

تولید ضریب فیلتر کالمن

$$K_k = P_k^- H_x^T(m_k^-, k) S_k^{-1}$$

اصلاح متغیرهای حالت (مقدار اصلی خروجی فیلتر کالمن)

$$m_k = m_k^- + K_k v_k$$

اصلاح ماتریس کوواریانس (مقدار نهایی کوواریانس)

$$P_k = P_k^- - K_k S_k K_k^T$$

#### ۴- شبیه‌سازی و نتایج

در مسئله به روز رسانی ناوبری با روش زاویه، ورود موقعیت هدف تنها در لحظه نخست  $X_0$  موجود است و پس از آن، متغیرهای حالت را باید توسط داده‌های خطا دار اندازه‌گیری (زاویه و ارتفاع)، برآورد کرد. به عبارت دیگر، آن چه به فیلتر داده می‌شود، شرایط اولیه، معادلات حرکت (سرعت که مشتق مکان است) و

$$H(X_k) = \begin{bmatrix} \phi_k \\ \gamma_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan^{-1} \frac{y_k}{x_k} \\ \tan^{-1} \frac{z_k}{\sqrt{x_k^2 + y_k^2}} \end{bmatrix} \quad (۱۲)$$

و  $R_k$  به علت خطای حسگر ما در تخمین محل هدف به وجود می‌آید که یک نویز سفید گوسی با میانگین صفر و کوواریانس  $R$  هست.

$$R_k \sim N(0, R) \quad (۱۳)$$

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_h & 0 \\ 0 & \sigma_\phi \end{bmatrix} \quad (۱۴)$$

خروجی حسگرهای اندازه‌گیری (ارتفاع و زاویه) بدون نویز

نیز بدین صورت قابل محاسبه خواهند بود.

$$h_{measured} = Z \quad (۱۵)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{y}{x}$$

$$measure = \begin{bmatrix} h_{measured} \\ \phi \end{bmatrix}$$

#### ۳- الگوریتم فیلتر غیرخطی کالمن

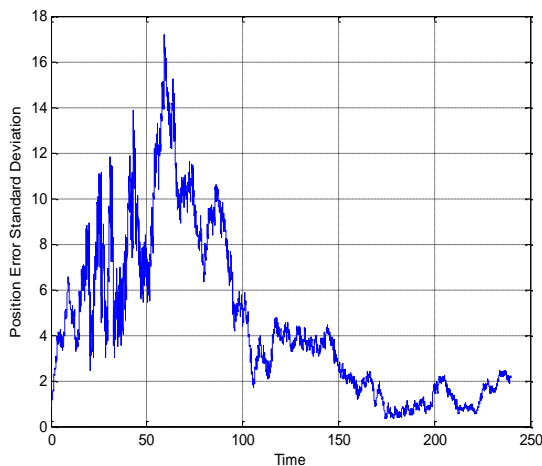
در اکثر کاربردهای عملی و به خصوص مسیریابی اهداف، هر دو معادله و یا حداقل یکی از معادلات حالت و مشاهدات غیرخطی هستند که این موضوع غیرگوسی شدن توابع احتمال می‌شود. روش‌های مختلفی برای حل غیرخطی و غیرگوسی وجود دارد. الگوریتم‌های مطلوب برای محاسبه و تخمین حالات بر اساس فرمول بیز چند روش هستند که معروف‌ترین آن‌ها روش فیلتر کالمن است [۸-۹]. توابع احتمال حالت پیشین، پیش‌بینی شده اولیه و پسین، نرمال و گوسی بوده و به شکل زیر خواهند بود [۱۰-۱۱]:

$$p(x_{k-1} | z^{k-1}) = N(x_{k-1}; \hat{x}_{k-1}, P_{k-1}) \quad (۱۶)$$

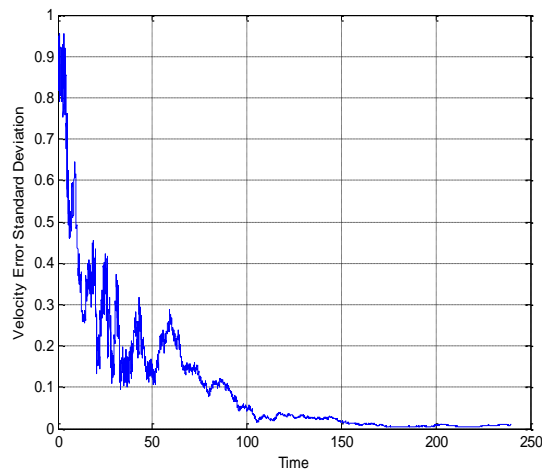
$$p(x_k | z^{k-1}) = N(x_k; \hat{x}_{k|k-1}, P_{k|k-1}) \quad (۱۷)$$

$$p(x_k | z^k) = N(x_k; \hat{x}_k, P_k) \quad (۱۸)$$

که به طور کلی تابع احتمال چگالی گوسی  $N(x; m, P)$  یک چگالی احتمال به آرگومان  $x$ ، متوسط  $m$  و کوواریانس  $P$  به صورت زیر تعریف می‌شود:



شکل (۲). نمودار انحراف معیار خطای موقعیت در حالت سه‌بعدی با فرض مشاهدات زاویه



شکل (۳). نمودار انحراف معیار خطای سرعت در حالت سه‌بعدی با فرض مشاهدات زاویه ورود

انحراف معیار لحظات اولیه سرعت و مکان تابع خطای مفروض لحظات اولیه هدف است. هر قدر خطای اولیه سرعت و مکان برای شرایط اولیه بزرگ‌تر باشد، این انحراف معیار نیز بزرگ‌تر خواهد بود؛ بنابراین ابتدا به دلیل خطای سرعت، انحراف معیار خطای مکان رشد خواهد کرد و پس از تثبیت روند کاهش خطای سرعت، انحراف معیار خطای مکان تا ابد روند نزولی خواهد داشت.

#### ۴-۲- ناوبری هدف درحالی‌که مشاهده در راستای z در اختیار نیست

در ناوبری هدف عمدتاً اندازه‌گیری هدف ارتفاع ممکن نیست. چرا که استفاده همزمان از رادارهای اندازه‌گیر زاویه و ارتفاع موجب بالا رفتن هزینه ناوبری می‌شود و سعی بر استفاده از اندازه‌گیری زاویه به‌تنهایی است. در این حالت همه چیز مشابه حالت قبل است و تنها اندازه‌گیری ارتفاع حذف می‌شود و فقط زاویه میان x و y آن را اندازه‌گیری می‌کنیم. نمودار انحراف معیار خطا برای حالت عدم وجود مشاهده Z در شکل (۴) برای

اندازه‌گیری‌های خطادار (ارتفاع و زاویه) بوده و فیلتر باید توسط آن‌ها، سرعت‌ها (که ثابت هستند) و مکان‌ها (که انتگرال سرعت تخمین زده شده هستند) را برآورد کند. بردار حالت هدف شامل مختصات x,y,z و سرعت هدف در راستای محورهای مختصاتی شامل  $v_x, v_y, v_z$  می‌باشد. مسئله ناوبری در سه حالت مسیریابی هدف ساده با روش زاویه ورود، مسیریابی هدف ساده در شرایطی که مشاهده‌ای از متغیر Z در دسترس نباشد و در حالتی که حسگرها دو هدف برای مشاهده داشته باشند، پیاده‌سازی می‌شود. در جدول (۱) پارامترهای لازم و شرایط اولیه برای شبیه‌سازی ارائه شده است.

جدول (۱). مقادیر پارامترهای فیلتر کالمن برای یک هدف

مقادیر	پارامترهای فیلتر کالمن
$X_0=(1000,100,0,-4,10,6)$	موقعیت هدف در لحظه نخست
$X_0=(0,0,0,3,3,3)$	موقعیت حسگر مشاهده
$T_s=0.01$	گام شبیه‌سازی
$T_T=240$	زمان شبیه‌سازی
$V=\text{diag}(2^2,0.05^2)$	کوواریانس نویز اندازه‌گیری
$P_0=\text{diag}(0.75,0.75,0.75,1,1,1)$	کوواریانس حالت در لحظه نخست

همچنین خطای موقعیت و سرعت نیز به شکل زیر مطرح خواهند شد.

$$e_{Position} = \sqrt{(X_{Real} - m_{(1)})^2 + (Y_{Real} - m_{(2)})^2 + (Z_{Real} - m_{(3)})^2}$$

$$e_{Velocity} = \sqrt{(V_{xReal} - m_{(4)})^2 + (V_{yReal} - m_{(5)})^2 + (V_{zReal} - m_{(6)})^2}$$

نتایج به‌صورت نمودار انحراف معیار خطای موقعیت و انحراف معیار خطای سرعت ارائه می‌شود. در این مقاله تمام نتایج براساس میانگین‌گیری از چند خروجی شبیه‌سازی به‌دست آمده است.

#### ۴-۱- ناوبری هدف با روش زاویه ورود در سه بعد

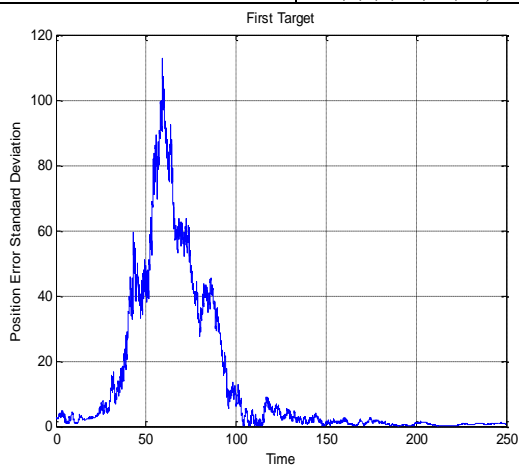
با داشتن موقعیت هدف (حقیقی و خطادار)، دو حسگر زاویه و یک حسگر ارتفاع انحراف معیار در حالت سه بعدی پیاده‌سازی می‌شود و نتیجه شبیه‌سازی در شکل (۲) به صورت نمودار انحراف معیار خطای موقعیت با روش زاویه ورود در سه بعد و در شکل (۳) نمودار انحراف معیار خطای سرعت را نشان داده شده است:

نخست شبیه سازی در موقعیت  $[0 \ 0 \ 0]^T$  قرار دارد.

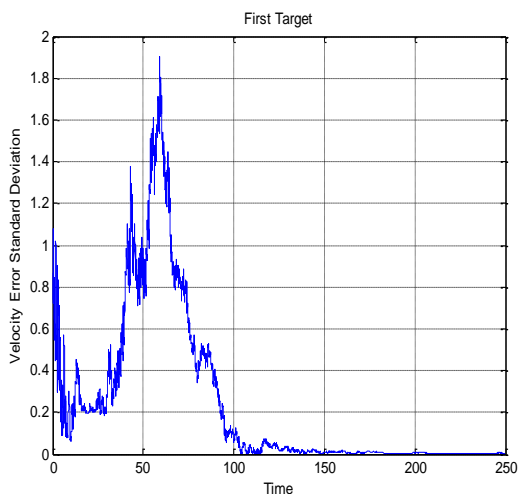
مبدأ مختصات به همراه مشاهده گر حرکت می کند؛ بنابراین اهداف نسبت به هم ثابت اند ولی به دلیل حرکت مشاهده گر که روی مبدأ مختصات قرار دارد، دارای سرعتی نسبت به مبدأ مختصات خواهند بود. در جدول (۲) مقادیر پارامترهای فیلتر کالمن برای دو هدف ارائه شده است.

جدول (۲). مقادیر پارامترهای فیلتر کالمن برای دو هدف

پارامترهای فیلتر کالمن	مقادیر
موقعیت هدف اول در لحظه نخست	$X_0=(800,1000,500)$
موقعیت هدف دوم در لحظه نخست	$X_0=(1200,400,500)$
موقعیت حسگر مشاهده	$X_0=(0,0,0,3,3,3)$
سرعت مشاهده گر	$V_0=(2,5,3)$
گام شبیه سازی	$T_s=0.01$
زمان شبیه سازی	$T_T=240$
کوواریانس نویز اندازه گیری	$V=diag(2^2,0.05^2)$
کوواریانس حالت در لحظه نخست	$P_0=diag(3,3,3,4.5,4.5,4.5,3,3,3,4.5,4.5,4.5)$

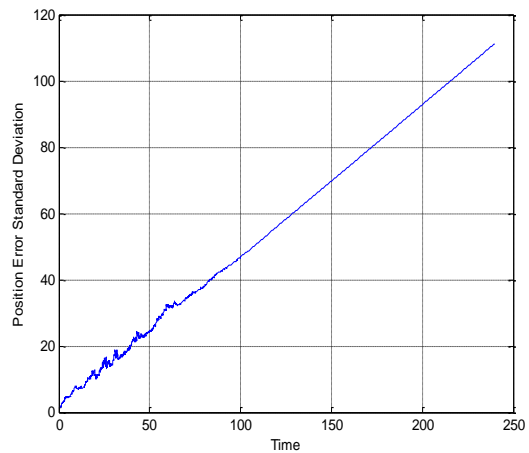


شکل (۳). نمودار انحراف معیار خطای موقعیت در حالت سه بعدی و با فرض مشاهدات زاویه و عدم وجود مشاهده Z

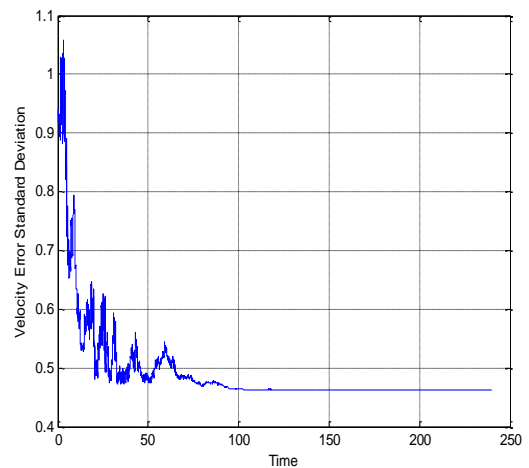


شکل (۴). نمودار انحراف معیار خطای سرعت در حالت سه بعدی و با فرض مشاهدات زاویه ورود و عدم وجود مشاهده Z

موقعیت و در شکل (۵) برای سرعت ارائه شده است:



شکل (۵). نمودار انحراف معیار خطای موقعیت در حالت سه بعدی و با فرض مشاهدات زاویه ورود و عدم وجود مشاهده Z



شکل (۶). نمودار انحراف معیار خطای سرعت در حالت سه بعدی و با فرض مشاهدات زاویه ورود و عدم وجود مشاهده Z

واریانس خطای سرعت، طبق انتظار روند نزولی دارد و به یک مقدار ماندگار (ناشی از کمبود مشاهده پذیری) میل می کند.

واریانس خطای مکان نیز به یک خط با شیب ثابت، ناشی از انتگرال مقدار ماندگار خطای سرعت میل می کند.

### ۳-۴ ناوبری برای دو هدف

دو هدف ثابت اند ولی مشاهده گر با سرعتی مشخص (سرعت ثابت) حرکت می کند؛ بنابراین موقعیت دو هدف نسبت به مبدأ مختصات همواره ثابت است اما چون دقیق آن را نمی دانیم از اندازه گیری که خود در حال حرکت است استفاده می کنیم و مبدأ مختصات همان مرجع اندازه گیری است. نمودار انحراف معیار خطا برای موقعیت و سرعت با فرض وجود دو هدف در شکل های (۹) - (۶) نشان داده شده است.

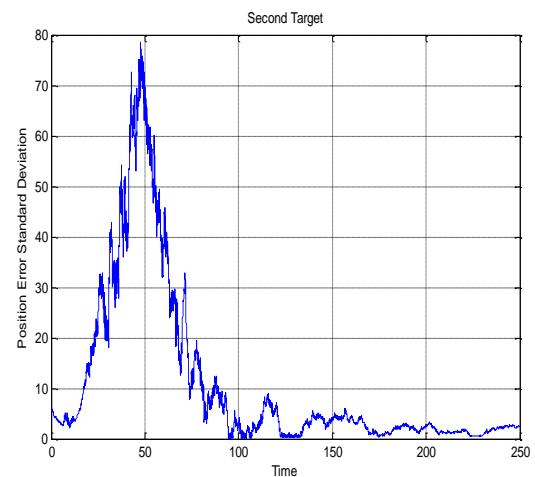
### فرضیات:

مشاهده گری که ارتفاع و زاویه هر یک از اهداف را به صورت مستقل اندازه گیری می کند، همان مبدأ مختصات بوده و در لحظه

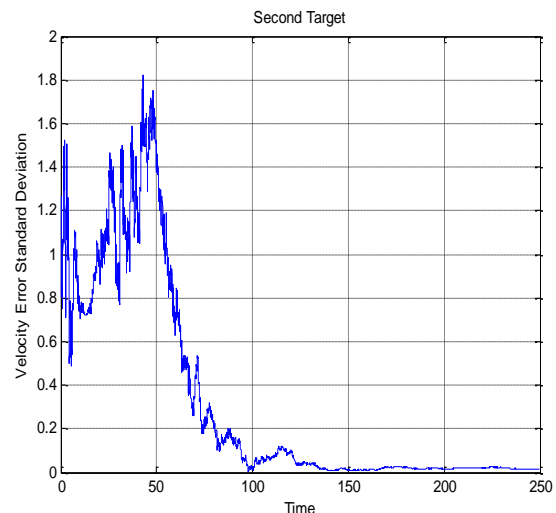
بررسی کرده و خطای اندازه‌گیری نشان داده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که بهره‌وری این روش با استفاده از فیلتر کالمن توسعه‌یافته با خطای ریشه میانگین مربعات کمتر و انحراف معیار عملکرد مناسب دارد. روش مکان‌یابی با زاویه‌سنجی غیرفعال دقت بالایی در عملکرد نسبت به روش‌های فعال دارد. در این مقاله مکان‌یابی به صورت غیرفعال بوده که از نظر تشعشعات رادیویی ویژگی بسیار مهمی در جنگ‌های الکترونیکی محسوب می‌شود.

## ۶- مراجع

- [1] B. Ristic and M. S Arulampalam, "Tracking a maneuvering target using angle-only measurements: algorithm and Performance," Signal Processing Elsevier, Jan. 2003.
- [2] K. Radhakrishnan, A. Unnikrishnan, and K. G. Balakrishnan, "EM based extended kalman filter for estimation of rotor time constant of induction motor," In in proc. Of International symposium on industrial electronics (ISIE06), Montreal, Que Canada, vol. 3, 2006.
- [3] R. E. Kalman, "A new approach to linear filtering and prediction problem" Transaction of the ASME-Journal of Basic Engineering," pp. 35-45, March 1960.
- [4] W. Zhang, M. Ghogho, and B. Yuan, "Mathematical Model and Matlab Simulation of Strap down Inertial Navigation System," Hindawi Publishing Corporation Modelling and Simulation in Engineering, Article ID 264537, 2012.
- [5] G. pulford and B. L. scalo, "A Survey of Maneuverings Target Tracking Method and Their Applicability to OTH Radar," Report of CSSIP-Unit. Of Melbourne, 1996.
- [6] M. Abidi, Y. Norouzi, and O. Salimi, "Passive Localization of Secondary Surveillance Radar Interrogators" IET radar, sonar navig, vol. 3, no. 4, pp. 11-23, 2016.
- [7] T. Lefevre, H. Bruyninckx, and J. D. Schutter, "Kalman Filters for nonlinear systems: a Comparison of Performance," IEEE Trans on Automatic Control, Oct. 2001.
- [8] N. Gordon, D. J. Salmond, and A. F. M. Smith, "Novel Approach to Nonlinear/NonGaussian Bayesian State Estimation," IEE Proceedings F - Radar and Signal Processing, Vol. 104, no. 2, pp. 107-113, Apr. 1993.
- [9] B. Ristic, S. Arulampalan, and N. Gordon, "Beyond the Kalman Filter-Particle Filters for Tracking Application," Artech House, 2004.
- [10] K. Radhakrishnan, A. Unnikrishnan, and K. G. Balakrishnan, "Bearing only Tracking of Maneuvering Targets using a Single Coordinated Turn Model," International Journal of Computer Applications, 2010.
- [11] S. Blackman and R. Popoli, "Design and Analysis of modern Tracking System," Artech House, 1999.



شکل (۸). نمودار انحراف معیار خطای موقعیت در حالت سه‌بعدی و با فرض مشاهدات زاویه و مشاهده هدف دوم



شکل (۹). نمودار انحراف معیار خطای سرعت در حالت سه‌بعدی و با فرض مشاهدات زاویه ورود و مشاهده هدف دوم

هر دو متغیر سرعت و مکان پس از یک افزایش در انحراف معیار، روند نزولی خواهند داشت. به دلیل این که مکان، انتگرال سرعت است، کاهش انحراف معیار مکان دیرتر از کاهش انحراف معیار سرعت خواهد بود.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، سعی بر آن بود تا با ارائه یک روش برای ناوبری هدف در سه بعد، مسیر حرکت هدف با کمترین خطا تعیین گردد.

ابتدا روابط حالت و مشاهده و اندازه‌گیری برای مسیریابی هدف مطرح گردید. سپس موقعیت بعدی هدف با اندازه‌گیری حسگرهای مشاهده (ارتفاع و زاویه) که با واریانس خطا نویزدار شده‌اند و فیلتر کالمن توسعه‌یافته تخمین زده می‌شود. در این جا این روش را با تغییر فرضیات اولیه و حالت‌های قرارگیری هدف

## Navigation Quality Improvement Using Passive Angle of Arrival Measurement

Y. Norouzi\*, N. Bayat

Amirkabir University of Technology

(Received: 28/10/2016, Accepted: 22/01/2017)

### Abstract

Navigation and localization are two key issues for many modern mobile applications. Navigation data can be gathered either passively (i.e. by means of INS) or actively (e.g. GPS, Loran). the passive navigation data Usually degrade through the time. On the other hand, the active methods are prone to interference and jamming. In this paper, the passive navigation method is aided by the measured angle of arrival from emitting objects (i.e. radars) at known locations. The results show that in the proposed method in contradiction to many other passive methods, while maintaining the passiveness of the system, using AoA measurement, the quality of navigation data is preserved or even improved through the time.

**Keywords:** Navigation, Angle of Arrival, Estimation, Array Processing, Tracking, Passive System

---

\* Corresponding author E-mail: y.norouzi@aut.ac.ir