

## طراحی سامانه تلفیق داده حسگرهای رادار و IR برای ردیابی هدف در شرایط اختلال نویزی

روح‌الله غلامی<sup>۱</sup>، مجید اخوت<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد، ۲- دانشیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۴/۰۸/۳۰، پذیرش: ۹۵/۰۸/۱۰)

### چکیده

دقت‌افزایی و هوشمندسازی تجهیزات و سامانه‌های نظامی از اولویت‌های مجموعه‌های دفاعی است. نیاز به تلفیق داده‌های حسگرهای مختلف برای ردیابی اهداف از نیازهای اساسی در حوزه‌های نظامی و غیرنظامی است. به‌علت این‌که در بیش‌تر مواقع داده‌های دریافتی از حسگرها با ابهام زیاد همراه بوده و تصمیم‌گیری فرماندهان نظامی را به‌خصوص در مواجهه با اختلال با مشکل روبرو می‌کند از این‌رو، توجه به جنبه‌های مختلف هدف و محیط عملیاتی می‌تواند کمک شایانی در نیل به این منظور نماید. در این مقاله با استفاده از فیلتر کالمن توسعه‌یافته، تخمین بردار حالت هدف و ماتریس خطای تخمین به‌عنوان ورودی پردازشگر مرکزی از طریق هر یک از حسگرها محاسبه می‌شود و تلفیق آن‌ها با روش ترکیب بردار اندازه‌گیری‌ها و ترکیب بردار حالت انجام می‌شود و سپس با اعمال اختلال نویزی، اثر تلفیق داده در شرایط اختلال نویزی ارزیابی می‌گردد. در ادامه جهت کاهش خطای تلفیق داده از روش فیدبک استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با طراحی سامانه تلفیق داده حسگرهای رادار و IR و استفاده از روش فیدبک برای ردیابی هدف در شرایط اختلال نویزی ضمن کاهش خطای تلفیق و افزایش دقت ردیابی می‌توان با وجود اختلال به ردیابی اهداف پرداخت و به تصمیم‌گیری فرماندهان نظامی کمک کرد.

### واژه‌های کلیدی: رادار، IR، تلفیق داده، فیلتر کالمن، اختلال نویزی

### ۱- مقدمه

رشد و گسترش سریع فناوری در دهه‌های اخیر، تحولی شگرف در اکثر زمینه‌های علمی ایجاد کرده است. از جمله این تغییرات، می‌توان خودکارکردن سامانه‌ها و وابستگی روزافزون اکثر ابعاد زندگی انسان به دستاوردهای فناوری را نام برد. این دگرگونی در محدوده نظامی به‌صورت پیشرفت‌های حسگری و تحمیل اکثر وظایف اپراتوری و انسانی به دستگاه، توفیق فوق‌العاده در پردازش سیگنال‌ها ظاهر شده است که نتیجه آن در اختیارگرفتن حجم زیادی از اطلاعات سنسج است؛ بنابراین سامانه‌های مراقبت و ردیاب نیز برای جبران محدودیت‌ها و ابهامات حسگری به استفاده از مجموعه‌ای از حسگرها روی آورده‌اند. آن‌چه امروز بقاء سامانه‌های مراقبت و ردیاب را نوید داده و برتری نهایی یگان‌های نظامی را ممکن می‌کند، به‌کارگیری الگوریتم‌های پردازش قدرتمند جهت پردازش طیف‌های گوناگون اطلاعات حسگری است تا تفسیری هماهنگ و مطمئن از اهداف و اوضاع نظامی منطقه مورد علاقه را در اختیار فرماندهان نظامی قرار داده و آن‌ها را در امر تصمیم‌سازی یاری نماید.

منظور از تلفیق داده اطلاعات، تلفیق داده‌های هم‌نوع از منابع مختلف برای دستیابی به اطلاعات دقیق‌تر و کامل‌تر است زیرا در اکثر موارد داده‌هایی که از منابع متعدد در مورد یک موضوع خاص در اختیار قرار می‌گیرد، ناقص، نامعین و گاهی همراه با خطا است. تلفیق اطلاعات چند حسگر به مساله چگونگی ترکیب اطلاعات حاصل از حسگرهای مختلف در یک شبکه متشکل از حسگرها می‌پردازد و برای کاربردهای نظامی و غیرنظامی استفاده می‌شود [۱].

هرچند مفهوم تلفیق اطلاعات به شکل فعلی آن موضوع جدیدی به شمار می‌آید که مورد توجه محققان و مهندسان این حوزه است ولی از دیدگاه زیستی موضوع تلفیق اطلاعات، بحث جدیدی نیست و در بدن انسان و حیوانات، چند حس مختلف وجود داشته و براساس ترکیب اطلاعات حواس پنج‌گانه به ارزیابی دقیق‌تر از محیط اطراف و اتخاذ تصمیم مناسب در شرایط مختلف و پیرامون می‌پردازد [۲].

علی‌رغم پیشرفت‌های فوق‌العاده، هنوز هیچ حسگر واحدی وجود ندارد که بتواند نیاز اطلاعاتی کامل به‌خصوص برای منطقه

حاصله از شبیه‌سازی‌ها ارائه شده‌اند. در بخش هفتم، جمع‌بندی نتایج مطرح می‌شود.

## ۲- استخراج داده حاصل از حسگرهای رادار و IR

حسگرهای متنوعی جهت ردیابی اهداف وجود دارد. در این مقاله از دو حسگر رادار و IR استفاده می‌شود. نکاتی که در انتخاب حسگرها مهم است، یکی پوشش هم‌دیگر در فضا و دیگری قابل اعتماد بودن داده حاصله از آن‌ها است تا بتوان تلفیق قابل اطمینانی به‌دست آورد؛ رادار، حسگری است فعال که پارامترهایی از قبیل فاصله، سرعت و زاویه هدف را اندازه‌گیری می‌کند و IR حسگری غیر فعال است که تشعشعات مادون قرمز اهداف را دریافت کرده و پس از فیلترینگ و پردازش، ضمن ارائه پیکسل‌های دیجیتالی هدف، براساس آن می‌توان موقعیت زاویه‌ای هدف را استخراج کرد.

رادارهای ردیاب برای تأمین اطلاعات پیرامون برد، زاویه سمت و زاویه ارتفاع هدف دقیق هستند که از آن به عنوان بردار اندازه‌گیری یاد می‌شود و به صورت  $X[n] = [R, \theta, \varphi]'$  است؛ و معادله اندازه‌گیری‌های رادار با رابطه (۲-۳) مدل می‌شود.

$$X[n] = h(S[n]) + w[n] \quad (1)$$

که در رابطه (۱)،  $S[n]$  بردار حالت هدف است که برای مثال در مختصات کارترین  $(x, y, z)$  برای اهداف دارای شتاب و سرعت به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود و  $h$  تابع غیرخطی است و در ادامه با بسط تیلور خطی‌سازی می‌شود.

$$S[n] = [r_x, r_y, r_z, v_x, v_y, v_z, a_x, a_y, a_z] \quad (2)$$

که در آن،  $w[n]$  بردار نویز اندازه‌گیری یا مشاهدات با توزیع  $w[n] \sim N(0, C[n])$  که نویز سفید گوسی با میانگین صفر است و با ماتریس کواریانس زیر مدل می‌شود که در آن  $\delta_{rR}^2$  و  $\delta_{\theta R}^2$  و  $\delta_{\varphi R}^2$  به ترتیب واریانس نویز اندازه‌گیری زاویه ارتفاع و زاویه سمت و برد است و اندیس  $R$  مربوط به اندازه‌گیری‌های رادار می‌باشد [۳].

$$C^R = \begin{bmatrix} \delta_{rR}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \delta_{\theta R}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \delta_{\varphi R}^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

تبدیل مختصات کارترین  $(x, y, z)$  به مختصات قطبی، برای تولید برد  $(R)$ ، زاویه سمت  $(\theta)$  و زاویه ارتفاع  $(\varphi)$  به صورت رابطه (۵) است. پارامترهای اندازه‌گیری‌شده از طریق حسگر IR تحت عنوان بردار اندازه‌گیری IR بوده و با  $X[n] = [\theta, \varphi]'$  تعریف می‌شود [۴-۵].

نبرد را تأمین کند. خصوصاً در زمان‌های وجود اختلال و ممانعت از عملکرد طبیعی حسگرها، به‌عنوان مثال حسگر رادار پارامترهایی از جمله فاصله و زاویه را فراهم می‌آورد اما توسط حسگر IR پارامترهایی مثل زاویه سمت و زاویه ارتفاع هدف قابل حصول است. موقعی که شرایط جنگ الکترونیک مانع ردیابی هدف توسط یک حسگر می‌شود، توسط حسگر دیگر قابل ردیابی خواهد بود و با تلفیق داده آن‌ها می‌توان به‌صورت هوشمند به آشکارسازی و ردیابی هدف ادامه داد. از جمله شرایط جنگ الکترونیک می‌توان به استفاده از اختلال نویزی در مقابل رادار و یا استفاده از فلر<sup>۱</sup> در مقابل دوربین‌های IR اشاره کرد.

از این‌رو، بهره‌گیری از حسگرهای رادار و IR و ردیابی هدف به‌صورت مجزا و تخمین بردار حالت هدف و ماتریس خطای تخمین توسط هر یک از آن‌ها، به‌عنوان ورودی پردازشگر مرکزی و استفاده از اطلاعات تلفیق‌شده آن‌ها ضمن دقت‌افزایی در ردیابی هدف می‌تواند برای مقاوم‌سازی سامانه در شرایط اختلال مؤثر باشد.

در بخش دوم، نحوه استخراج داده حاصل از حسگر رادار و IR جهت تلفیق بررسی می‌شود و همچنین به نحوه مدل‌نمودن معادلات اندازه‌گیری و پارامترهای اندازه‌گیری مورد توجه برای تلفیق داده آن‌ها پرداخته می‌شود. در بخش سوم، فیلتر ردیاب تک‌حسگری و نحوه تخمین بردار حالت هدف و ماتریس خطای تخمین که از طریق این فیلتر به‌دست آمده و از عوامل مهم برای تلفیق داده می‌باشد و به‌عنوان ورودی‌های پردازشگر مرکزی به حساب می‌آیند، بررسی خواهد شد. از جمله فیلترهای ردیاب خطی می‌توان فیلترهایی با ضرایب بهره ثابت  $(\alpha\beta)$  و  $(\alpha\beta\gamma)$  و فیلتر کالمن استاندارد (اسکالر و برداری) با مدل‌های سرعت ثابت، شتاب ثابت و از فیلترهای غیرخطی می‌توان فیلترهای شبه بهینه مانند فیلتر کالمن توسعه‌یافته  $(EKF^2)$ ، فیلتر کالمن نمونه‌برداری  $(UKF^3)$  را نام برد که در این مقاله با توجه به اندازه‌گیری‌های غیرخطی هر دو حسگر رادار و IR فیلتر  $EKF$  مدنظر است. در بخش چهارم، الگوریتم تلفیق داده چند حسگر مبتنی بر فیلتر کالمن که شامل تلفیق با روش‌های ترکیب اندازه‌گیری‌ها است پرداخته می‌شود. در بخش پنجم، نحوه تلفیق داده حسگر رادار و IR به روش ترکیب بردار اندازه‌گیری‌ها با فیلتر ردیاب  $EKF$  نشان داده شده و در بخش ششم، نتایج شبیه‌سازی‌ها برای الگوریتم ارائه‌شده بیان می‌شود. برای این کار داده‌های راداری در سناریوهایی نزدیک به واقعیت شبیه‌سازی شده‌اند و نتایج به‌صورت نمودارهای

1- Flares

2- Extended Kalman Filter

3- Unscented Kalman Filter

داده‌های دریافتی از قبل در تخمین‌های فعلی به کار می‌روند. بنابراین تمام اطلاعات مورد استفاده قرار می‌گیرند.

### ۳-۱- فیلتر کالمن توسعه یافته (EKF)

از آنجایی که در عمل رابطه بین داده‌ها و امان‌های دینامیکی هدف غیرخطی است، علی‌رغم پیچیدگی زیاد محاسباتی و پیدانشدن جواب‌های صریح برای معادلات، گاهی اوقات ناچار به استفاده از فیلترهای غیرخطی هستیم. اما در عمل، به‌خاطر مقدر نبودن استفاده از روابط غیرخطی بهینه، از فیلترهای غیرخطی شبه بهینه استفاده می‌شود. فیلتر کالمنی که در حوالی کواریانس و میانگین تخمین موجود به‌صورت خطی درآمده است، تحت عنوان فیلتر کالمن توسعه یافته یا EKF بررسی می‌شود [۶]. در برخی موارد مانند سری‌های تیلور، می‌توانیم تخمین را در حوالی تخمین جاری با استفاده از مشتقات جزئی، توابع اندازه‌گیری و حالت به‌صورت خطی در آوریم تا تخمین‌های بهتری در هنگام مواجهه با روابط غیرخطی به‌دست آوریم. معادلات حالت و مشاهدات فیلتر کالمن غیرخطی به‌صورت (۶-۷) است.

$$S[n] = a(S[n-1]) + Bu[n] \quad (6)$$

$$X[n] = h(S[n]) + w[n] \quad (7)$$

معادلات بازگشتی فیلتر کالمن توسعه یافته پس از خطی‌سازی در جدول (۱) آمده است [۷]. تابع غیرخطی  $a$  در معادله دیفرانسیل فوق، حالت در مرحله زمان قبلی  $n-1$  را به حالت در مرحله زمان فعلی  $n$  ارتباط می‌دهد. این امر پارامترهایی نظیر تابع ورودی  $u[n]$  و نویز فرآیند را نیز شامل می‌شود. تابع غیرخطی  $h$  در معادله اندازه‌گیری، حالت  $S[n]$  را به اندازه‌گیری  $X[n]$  ارتباط می‌دهد.

جدول (۱): معادلات بازگشتی فیلتر کالمن توسعه یافته پس از خطی‌سازی

$S[n] = A[n-1]S[n-1] + Bu[n] + V[n]$	بردار حالت هدف
$V[n] = a\hat{S}[n-1 n-1] - A[n-1]S^*[n-1 n-1]$	اثر خطی‌سازی بردار حالت
$X[n] = H[n]S[n] + W[n] + Z[n]$	بردار اندازه‌گیری یا مشاهدات
$Z[n] = h(\hat{S}[n n-1]) - H[n]\hat{S}[n n-1]$	اثر خطی‌سازی مشاهدات
$\hat{S}[n n-1] = a(\hat{S}[n-1 n-1])$	پیش‌گویی
$M[n n-1] = A[n-1]M[n-1 n-1]A[n-1]^T + BQB^T$	ماتریس خطای پیش‌گویی
$K[n] = M[n n-1]H[n]^T(H[n]M[n n-1]H[n]^T + C[n])^{-1}$	بهره کالمن
$\hat{S}[n n] = \hat{S}[n n-1] + k[n](X[n] - h(\hat{S}[n n-1]))$	تصحیح خطا
$M[n n] = (I - K[n]H[n])M[n n-1]$	ماتریس خطای تخمین
$A[n-1] = \frac{\partial a}{\partial S[n-1]} \Big _{S[n-1]} \Big  S[n-1] = \hat{S}[n-1 n-1]$	ماتریس ژاکوبین‌های $a$
$H[n] = \frac{\partial h}{\partial S[n]} \Big _{S[n]} \Big  S[n] = \hat{S}[n n-1]$	ماتریس ژاکوبین‌های $h$

$$C^I = \begin{bmatrix} \delta_{\theta I}^2 & 0 \\ 0 & \delta_{\varphi I}^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \theta = \tan^{-1}(y/x), \quad (5)$$

$$\varphi = \tan^{-1}(z/\sqrt{x^2 + y^2})$$

در ماتریس کواریانس معادله (۴)،  $\delta_{\theta I}^2$  و  $\delta_{\varphi I}^2$  به ترتیب واریانس نویز اندازه‌گیری زاویه ارتفاع و زاویه سمت است و اندیس  $I$  مربوط به اندازه‌گیری‌های  $IR$  می‌باشد.

### ۳- فیلتر ردیاب و نحوه تخمین بردار حالت هدف و ماتریس خطای تخمین

از عوامل مهمی که برای تلفیق داده حسگرها در این مقاله مدنظر است یکی تخمین بردار حالت هدف، و دیگری ماتریس خطای تخمین است. در این بخش به دنبال روابط ریاضی و نحوه محاسبه تخمین بردار حالت هدف و ماتریس خطای تخمین با استفاده از فیلترهای ردیاب هستیم. برای این کار، از فیلترهای ردیاب با الگوریتم‌های بازگشتی استفاده می‌شود. این روش‌ها به دلیل داشتن قابلیت تخمین دینامیک هدف پس از هر بار اندازه‌گیری از جذابیت بسیار بالایی برخوردار هستند. با توجه به این که سامانه‌های دینامیکی را می‌توان به دو گروه سامانه‌های دینامیکی خطی و غیرخطی تقسیم نمود، لذا برای تخمین آن‌ها به ترتیب از فیلترهای ردیابی خطی و غیرخطی استفاده می‌شود. از جمله فیلترهای خطی می‌توان فیلترهای با ضرایب بهره ثابت  $\alpha\beta$  و  $\alpha\beta\gamma$ ، فیلتر کالمن استاندارد با مدل‌های سرعت ثابت، شتاب ثابت و از فیلترهای غیرخطی می‌توان فیلترهای شبه بهینه مانند فیلتر کالمن توسعه یافته (EKF)، فیلتر کالمن نمونه‌بردار (UKF) را نام برد. در این جا به علت اندازه‌گیری‌های غیرخطی حسگرها، از فیلتر کالمن توسعه یافته استفاده شده است. این فیلترها از نوع حافظه‌بر هستند که می‌توانند به‌طور بازگشتی پیاده‌سازی شوند.

$$H_R = \begin{bmatrix} \hat{x}/\hat{R} & \hat{y}/\hat{R} & \hat{z}/\hat{R} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\hat{y}/\hat{R}^2 & \hat{x}/\hat{R}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\hat{x}\hat{y}/\hat{R}^2 \hat{R}_h & -\hat{x}\hat{z}/\hat{R}^2 \hat{R}_h & \hat{R}_h/\hat{R}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$H_I = \begin{bmatrix} -\hat{y}/\hat{R}_h^2 & \hat{x}/\hat{R}_h^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\hat{x}\hat{y}/\hat{R}_h^2 \hat{R}_h & -\hat{x}\hat{z}/\hat{R}_h^2 \hat{R}_h & \hat{R}_h/\hat{R}_h^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

ماتریس توزیع نویز (B) و ماتریس انتقال بردار حالت (A) در فضای سه‌بعدی براساس معادله (۲) برای اهداف با شتاب ثابت به صورت روابط زیر است که در ماتریس‌های (۱۳-۱۴)، T زمان نمونه برداری حسگر است.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 & T^2/2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 & T^2/2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 & T^2/2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$B = \begin{bmatrix} T^2/2 & 0 & 0 \\ 0 & T^2/2 & 0 \\ 0 & 0 & T^2/2 \\ T & 0 & 0 \\ 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & T \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

H[n] ماتریس ژاکوبین مشتقات جزئی h و A[n] ماتریس ژاکوبین مشتقات جزئی a نسبت به S است. W[n] نویز گوسی سفید با میانگین صفر و با ماتریس کواریانس C مشخص شده است. میزان کارایی این فیلتر، به دقت خطی‌سازی بستگی دارد و با معیار MMSE مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این مقاله، بردار حالت هدف در مختصات کارتزین و به صورت خطی است. بنابراین، نیاز به خطی‌سازی و تشکیل ماتریس ژاکوبین مشتقات جزئی a نسبت به بردار حالت نیست و ماتریس انتقال حالت، همان ماتریس انتقال در مدل خطی است اما به علت وجود اندازه‌گیری‌های غیرخطی حسگرها، نیاز به خطی‌سازی و تشکیل ماتریس ژاکوبین مشتقات جزئی h نسبت به بردار حالت است. برای حسگرهای رادار و IR ماتریس انتقال حالت به اندازه‌گیری به صورت زیر است [۸-۹].

$$h_r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \quad h_\theta = \tan^{-1}(y/x), \quad (8)$$

$$h_\phi = \tan^{-1}(z/\sqrt{x^2 + y^2})$$

$$\hat{R}_h = \sqrt{\hat{x}^2 + \hat{y}^2}, \quad \hat{R} = \sqrt{\hat{x}^2 + \hat{y}^2 + \hat{z}^2} \quad (9)$$

$$H_R = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_r}{\partial x} & \frac{\partial h_r}{\partial y} & \frac{\partial h_r}{\partial z} & \frac{\partial h_\theta}{\partial x} & \frac{\partial h_\theta}{\partial y} & \frac{\partial h_\theta}{\partial z} & \frac{\partial h_\phi}{\partial x} & \frac{\partial h_\phi}{\partial y} & \frac{\partial h_\phi}{\partial z} \\ \frac{\partial h_\theta}{\partial x} & \frac{\partial h_\theta}{\partial y} & \frac{\partial h_\theta}{\partial z} & \frac{\partial h_\phi}{\partial x} & \frac{\partial h_\phi}{\partial y} & \frac{\partial h_\phi}{\partial z} & \frac{\partial a_x}{\partial x} & \frac{\partial a_x}{\partial y} & \frac{\partial a_x}{\partial z} \\ \frac{\partial h_\phi}{\partial x} & \frac{\partial h_\phi}{\partial y} & \frac{\partial h_\phi}{\partial z} & \frac{\partial a_x}{\partial x} & \frac{\partial a_x}{\partial y} & \frac{\partial a_x}{\partial z} & \frac{\partial a_y}{\partial x} & \frac{\partial a_y}{\partial y} & \frac{\partial a_y}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (10)$$

جدول (۲): معادلات تلفیق داده مبتنی بر ترکیب بردار حالت

$\hat{S}_T[n n] = \hat{S}_1[n n] + M_1[n n](M_1[n n] + M_2[n n])^{-1}(\hat{S}_2[n n] - \hat{S}_1[n n])$	تلفیق بردار حالت
$M_T[n n] = M_1[n n] - M_1[n n](M_1[n n] + M_2[n n])^{-1}M_1[n n]^T$	کواریانس خطای تخمین
$\hat{S}_i[n n] = S[n] - \hat{S}_i[n n-1] - K_i[n](X_i[n] - H_i[n]\hat{S}_i[n n-1]) = [1 - K_i[n]H_i[n]]\hat{S}_i[n n-1] - K_i[n]W_i[n]$ $\hat{S}_i[n n-1] = S[n] - \hat{S}_i[n n-1] = A[n]S[n-1] - A[n]\hat{S}_i[n-1 n-1] + B[n]V[n] = A[n]\hat{S}_i[n-1 n-1] + B[n]V[n]$	خطای بین بردار حالت و تخمین
$M_{ij}[n n] = E[\hat{S}_i[n n]\hat{S}_j^T[n n]] = [1 - K_i[n]H_i[n]]M_{ij}[n n-1][1 - K_j[n]H_j[n]]^T$ $M_{ij}[n n-1] = E[\hat{S}_i[n n-1]\hat{S}_j^T[n n-1]] = A[n]M_{ij}[n-1 n-1]A^T[n] + B[n]Q[n]B^T[n]$	همبستگی متقابل
$\hat{S}_T[n n] = \hat{S}_i[n n-1] + M_{i/j}[n n]M_{i+j}^{-1}[n n](\hat{S}_j[n n] - \hat{S}_i[n n])$ $M_T[n n] = M_i[n n] - M_{i/j}[n n]M_{i+j}^{-1}[n n]M_{i/j}^T[n n]$ $M_{i/j}[n n] = M_i[n n] - M_{ij}[n n], M_{i+j}[n n] = M_i[n n] + M_j[n n] - M_{ij}[n n] - M_{ij}^T[n n]$ $\hat{S}_T[n n] = \hat{S}_i[n n] + (M_i[n n] - M_{ij}[n n])[M_i[n n] + M_j[n n] - M_{ij}[n n] - M_{ij}^T[n n]]^{-1} \times [\hat{S}_j[n n] - \hat{S}_i[n n]]$ $M_T[n n] = M_i[n n] - [M_i[n n] - M_{ij}[n n]][M_i[n n] + M_j[n n] - M_{ij}[n n] - M_{ij}^T[n n]]^{-1} \times [M_i[n n] - M_{ij}[n n]]^T$	تلفیق بردار حالت و کواریانس خطای تخمین با در نظر گرفتن همبستگی متقابل حسگرها

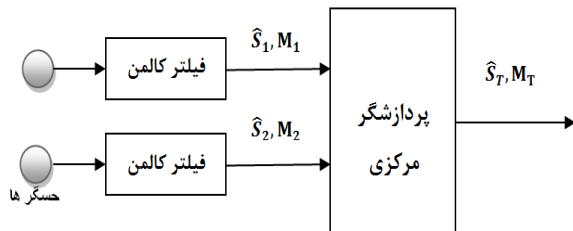
$$X[n] = [\sum_{i=1}^N C_i^{-1}[n]]^{-1} \sum_{i=1}^N C_i^{-1}[n] X_i[n] \quad (15)$$

$$H[n] = [\sum_{i=1}^N C_i^{-1}[n]]^{-1} \sum_{i=1}^N C_i^{-1}[n] H_i[n] \quad (16)$$

$$C[n] = [\sum_{i=1}^N C_i^{-1}[n]]^{-1} \quad (17)$$

#### ۴-۲- تلفیق داده مبتنی بر ترکیب بردار حالت

در این روش مشابه بلوک دیاگرام شکل (۲)، برای هر مجموعه از مشاهدات از یک فیلتر کالمن به منظور تخمین حالت استفاده می‌شود. پس از این مرحله، تخمین‌های حالت و ماتریس‌های کوواریانس خطای تخمین دو حسگر با صرف نظر کردن از کوواریانس متقابل خطای تخمین برای دو حسگر ( $M_{12} = 0$ ) به صورت معادلات جدول (۲) با هم ترکیب می‌شوند [۱۳-۱۴].



شکل (۲): نمایش تلفیق داده مبتنی بر ترکیب بردارهای حالت

چنانچه ره‌گیری حسگرها با هم هم‌بستگی داشته باشند مثلاً ره‌گیری  $\hat{S}_i[n|n]$  و  $\hat{S}_j[n|n]$  نسبت به هم، هم‌بسته باشند آن‌گاه روابط فوق برای خروجی پردازشگر مرکزی تغییر خواهد کرد. اگر بخواهیم هم‌بستگی بین حسگرها را نیز در نظر بگیریم و به روابط کلی و جامع‌تری برسیم، برای محاسبه هم‌بستگی بین حسگرها ابتدا بایستی خطای بین بردار حالت و تخمین بردار حالت را محاسبه کنیم روابط ریاضی و معادلات تلفیق به روش بردار حالت بدون هم‌بستگی متقابل دو حسگر و با در نظر گرفتن هم‌بستگی متقابل آن‌ها در جدول (۲) آمده است [۱۵].

#### ۵- تلفیق داده حسگر رادار و IR به روش ترکیب بردارهای اندازه‌گیری با فیلتر ردیاب EKF

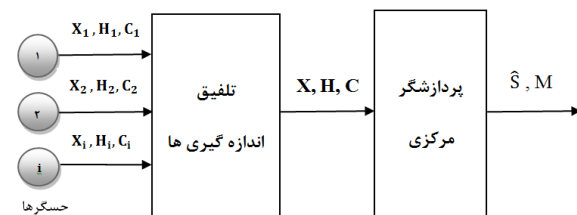
مطابق بلوک دیاگرام شکل (۳)، داده حاصل از حسگر رادار که شامل اطلاعات فاصله، زاویه سمت و زاویه ارتفاع است پس از تفکیک برد به مرکز تلفیق فرستاده می‌شود و در آن‌جا اطلاعات زاویه سمت و ارتفاع حسگر رادار و IR به روش ترکیب بردار اندازه‌گیری‌ها با هم تلفیق شده و به همراه اطلاعات فاصله که از طریق حسگر رادار به‌دست‌آمده به فیلتر کالمن توسعه‌یافته اعمال

#### ۴- الگوریتم‌های تلفیق داده چند حسگر

روش‌های متنوعی جهت ترکیب اطلاعات وجود دارد و برحسب این‌که مشخصات ورودی و خروجی فرآیند چه باشد، با هم متفاوت هستند. از جمله روش‌های شبکه عصبی و منطق فازی، الگوریتم‌های ژنتیک و سامانه‌های خبره و روش‌های تخمین نظیر بیزین<sup>۱</sup>، دمپستر-شفر<sup>۲</sup> و کالمن فیلتر<sup>۳</sup> را می‌توان نام برد [۱۰]. از روش‌های بیزین و دمپستر شفر بیش‌تر برای تلفیق اطلاعات حسگرهایی که دارای عدم قطعیت هستند، استفاده می‌شود و برای تلفیق داده‌های تخمین ردیابی هدف از الگوریتم‌های تلفیق داده به روش کالمن فیلتر استفاده می‌شود. تلفیق داده براساس فیلتر کالمن شامل ترکیب بردار حالت و ترکیب بردار اندازه‌گیری‌ها است. در روش تلفیق بردار حالت یک گروه فیلتر کالمن برای به‌دست‌آوردن تخمین بردار حالت به صورت مجزا از هم به کار برده می‌شوند و در مرحله بعد بردارها با یکدیگر تلفیق شده و تخمین حالت بهبودیافته حاصل می‌گردد. در روش ترکیب بردار اندازه‌گیری‌ها، خروجی هر حسگر مستقیماً با استفاده از وزن‌های خاصی با یکدیگر ترکیب می‌شوند و سپس یک فیلتر کالمن براساس این مشاهدات ترکیبی، بردار حالت نهایی را تخمین می‌زند. در این مقاله جهت تلفیق داده حسگر رادار و IR از هر دو روش ترکیب اندازه‌گیری‌ها و ترکیب بردار حالت استفاده شده است.

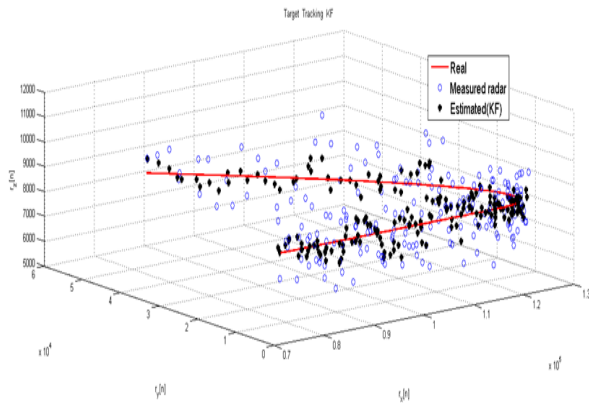
#### ۴-۱- تلفیق داده مبتنی بر ترکیب بردارهای اندازه‌گیری

روش تلفیق بردار اندازه‌گیری مطابق شکل (۱)، به این صورت عمل می‌شود که در این روش از مجموع وزن‌دار شده بردارهای اندازه‌گیری با توجه به وجود  $\sum_{i=1}^N C_i^{-1}[n] X_i[n]$  در رابطه (۱۴) که در آن  $C[n]$  بردار ضرایب و وزن‌ها است برای تلفیق داده استفاده می‌شود. در این شیوه روابط (۱۷-۱۵) برای فیلتر کالمن به‌دست می‌آید. [۱۱-۱۲].



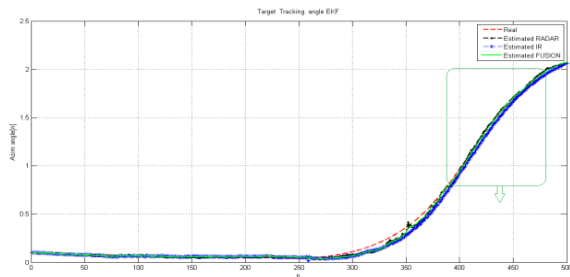
شکل (۱): نمایش تلفیق داده مبتنی بر ترکیب اندازه‌گیری‌ها

- 1- Bayesian
- 2- Dempster-Shafer
- 3- Kalman Filter

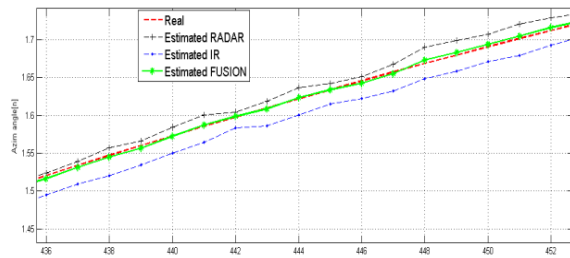


شکل (۵): نمایش حرکت واقعی هدف و ردیابی آن با فیلتر کالمن

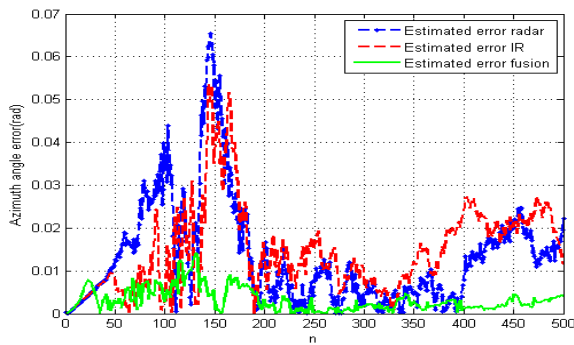
در شکل‌های (۶-۷) ردیابی زاویه سمت توسط هر یک از حسگرها و تلفیق آن‌ها نشان داده شده است.



شکل (۶): ردیابی زاویه سمت توسط حسگرها و تلفیق داده

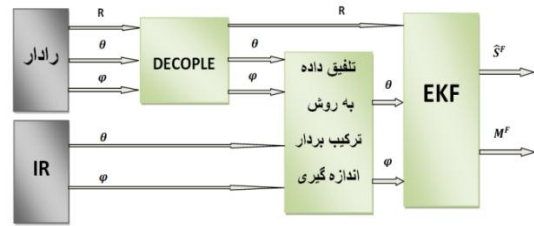


شکل (۷): بزرگ‌نمایی ردیابی زاویه سمت توسط حسگرها و تلفیق داده نمودار خطای تخمین زاویه سمت با فیلتر کالمن توسعه‌یافته توسط هر یک از حسگرها و خطای تلفیق داده آن‌ها به روش ترکیب اندازه‌گیری‌ها در شکل (۸) آمده است.



شکل (۸): نمودار خطای تخمین زاویه سمت و خطای تلفیق

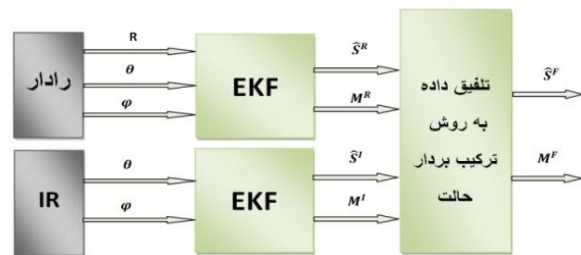
می‌شود تا ردیابی انجام شود. در این‌جا بردار حالت تلفیقی شامل اطلاعات برد نیز می‌باشد.



شکل (۳): بلوک دیاگرام تلفیق داده رادار و IR روش ترکیب بردارهای اندازه‌گیری

### ۶- تلفیق داده حسگر رادار و IR به روش ترکیب بردار حالت با فیلتر ردیاب EKF

چنان‌چه حسگرهای رادار و IR را با فیلتر کالمن توسعه‌یافته به صورت بلوک دیاگرام شکل (۴) در نظر بگیریم، ابتدا تخمین بردار حالت هدف  $\hat{s}[n]$  و ماتریس حداقل MSE تخمین یا ماتریس خطای تخمین  $M[n]$ ، توسط فیلترهای کالمن توسعه‌یافته ایجاد شده و به پردازشگر مرکزی ارسال می‌شود و در آن‌جا تلفیق داده به روش ترکیب بردار حالت صورت می‌گیرد. در حسگر IR برد  $(R)$  را نداریم و حسگر در این خصوص اطلاعاتی نمی‌دهد. بنابراین، یک روش استفاده از اطلاعات برد از طریق حسگر رادار است و روش دوم به کارگیری حسگر دیگری نظیر  $LRF^1$  در کنار IR برای مشخص کردن برد هدف که در مرجع [۱۵] آمده است.

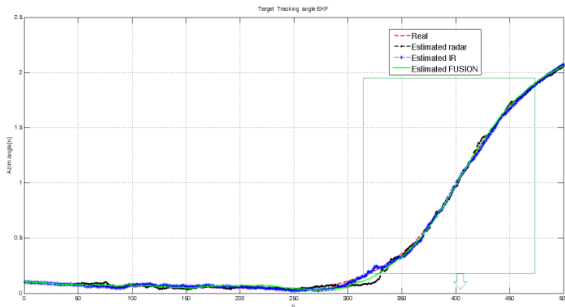


شکل (۴): بلوک دیاگرام تلفیق داده رادار و IR به روش ترکیب بردارهای حالت

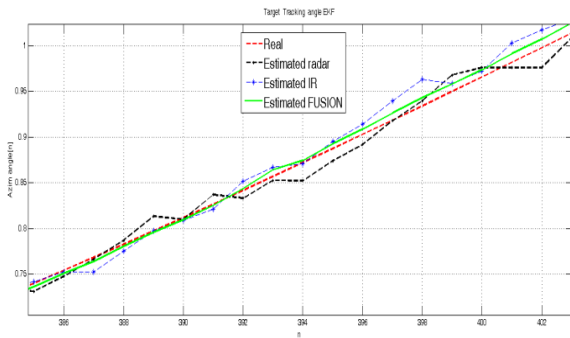
### ۷- شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی الگوریتم تلفیق داده، سناریوی حرکتی مسیر اصلی هدف در مختصات کارتزین برحسب متر با موقعیت اولیه  $(۷۷۰۰۰, ۸۰۰۰, ۸۰۰۰)$  متر در  $۵۰۰$  اسکن با نرخ نمونه‌برداری یک ثانیه، در  $۲۵۰$  ثانیه اول هدف با سرعت ثابت  $(۴۴۶, ۰, ۰)$  متر بر ثانیه در حال حرکت بوده و ناگهان شتاب می‌گیرد و با شتاب ثابت  $(۱۵, ۱۰, ۵)$  متر بر مجذور ثانیه و سرعت  $(۰, ۴۴۶, ۰)$ ،  $۲۵۰$  ثانیه دیگر را به حرکت خود ادامه می‌دهد (شکل ۵).

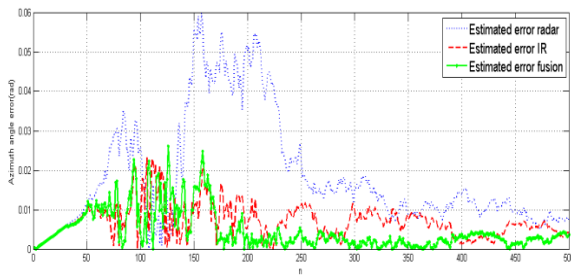
می‌کند تا جهت بهبود دقت ردیابی هدف از خروجی بلوک تلفیق که شامل اطلاعات زاویه سمت و ارتفاع و برد بهبودیافته در اثر تلفیق است برای ادامه ردیابی استفاده نمود تا کمبود حسگر IR در خصوص اطلاعات برد جبران شود. ضمن این‌که اگر تلفیق با مشکل روبرو شده و قابل اعتماد نباشد از اطلاعات رادار جهت ادامه ردیابی هدف می‌توان استفاده نمود.



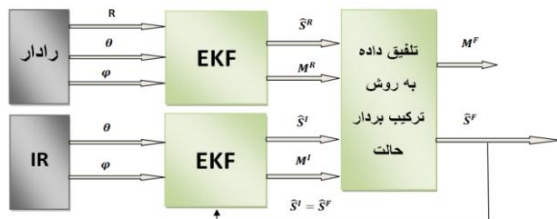
شکل (۱۰): ردیابی زاویه سمت توسط حسگرها و تلفیق داده



شکل (۱۱): بزرگ‌نمایی ردیابی زاویه سمت توسط حسگرها و تلفیق داده



شکل (۱۲): نمودار خطای تخمین زاویه سمت و خطای تلفیق

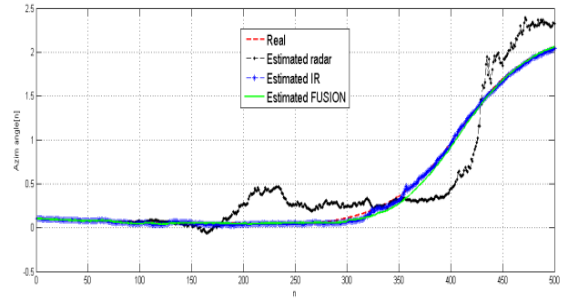


شکل (۱۳): استفاده از روش فیدبک برای حسگر IR

همان‌طورکه از شکل (۱۴) مشخص است استفاده از روش

### ۷-۱- اثر اختلال نویزی بر حسگر رادار و تلفیق داده

شکل (۹) نمودار حاصله از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است در این روش نیز در هنگام اختلال تأثیر حسگر مورد اختلال به‌صورت هوشمند در تلفیق کاهش یافته و تلفیق با داده حسگر دیگر ادامه می‌یابد. در این‌جا اختلال نویزی مدنظر است و در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده اثر این اختلال با افزایش واریانس نویز اندازه‌گیری حسگر نمایش داده شده است.



شکل (۹): اثر اختلال نویزی بر ردیابی حسگر رادار و تلفیق داده

### ۷-۲- شبیه‌سازی تلفیق داده مبتنی بر ترکیب بردار حالت

برای شبیه‌سازی عملکرد بلوک دیاگرام شکل (۴)، مطابق سناریوی تعریف‌شده برای مسیر حرکت هدف، پس از تخمین بردار حالت هدف  $\hat{s}[n]$ ، و ماتریس حداقل MSE تخمین یا ماتریس خطای تخمین  $M[n]$ ، توسط فیلترهای کالمن توسعه یافته و ارسال آن به پردازشگر مرکزی و انجام تلفیق داده به روش ترکیب بردار حالت، در نتیجه ردیابی زاویه سمت توسط هر یک از حسگرها و تلفیق آن‌ها در شکل‌های (۱۰-۱۱) نشان داده شده است.

نمودار خطای تخمین زاویه سمت با فیلتر کالمن توسعه‌یافته توسط هر یک از حسگرها و خطای تلفیق داده آن‌ها به روش ترکیب بردار حالت در شکل (۱۲) آمده است.

### ۷-۳- ارائه روش جدید و مقایسه آن با روش‌های قبلی

در این قسمت ابتدا روش جدید توضیح داده می‌شود و بلوک دیاگرام روش‌های به‌کار گرفته‌شده در کاهش خطای تلفیق آورده شده و شبیه‌سازی می‌شود و در ادامه نمودار مقایسه تلفیق با روش‌های قبلی و روش جدید شبیه‌سازی شده و مشخص می‌شود که روش جدید باعث کاهش خطا در تلفیق داده رادار و IR خواهد شد.

### ۷-۳-۱- استفاده از روش فیدبک برای حسگر IR

بردار حالت حاصل از تلفیق شامل اطلاعات برد است. بنابراین، انجام روش فیدبک مطابق بلوک دیاگرام شکل (۱۳) کمک

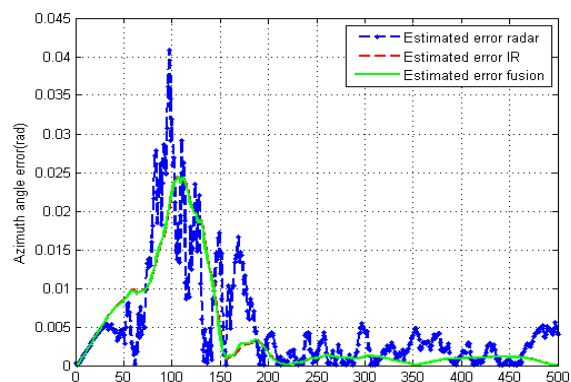
## ۸- نتایج

در این مقاله ابتدا ردیابی هدف مطابق سناریوی تعریف شده توسط هریک از حسگرهای رادار و IR با فیلتر کالمن توسعه یافته (EKF) انجام شده و تلفیق داده دو حسگر با روش ترکیب اندازه گیری ها و ترکیب بردار حالت، صورت گرفته است. نمودارهای حاصله از شبیه سازی ها نشان می دهد که خطای ردیابی با تلفیق داده دو حسگر از خطای ردیابی با هر یک از حسگرها کم تر است و تلفیق داده باعث بهبود ردیابی شده است. هم چنین با اعمال اختلال نویزی بر روی حسگر رادار، در الگوریتم تلفیقی تأثیر داده رادار به صورت هوشمند کم شده و ادامه ردیابی با داده IR انجام می شود و ردیابی هدف در شرایط اختلال، ادامه دارد. در ادامه جهت کاهش خطای تلفیق از روش فیدبک استفاده شده است. همان طور که از نتایج شبیه سازی در نمودار مقایسه خطاهای تلفیق مشخص است، این روش باعث کاهش خطای تلفیق و بهبود ردیابی شده است.

## ۹- مراجع

- [1] O. Kessler and F. White, "Data Fusion Perspectives and Its Role in Information Processing," in Handbook of Multi sensor Data Fusion, 2nd ed., M. Liggins, D. Hall, J. Llinas, CRC Press, 2008.
- [2] P. Valin, A. Jouan, and E. Boose, "Demonstration of Data/Information Fusion Concepts for Airborne Maritime Surveillance Operations," Defence R&D Canada, 2006.
- [3] Z. Xie and H. Gao, "A Radar / IR Weighted Fusion Algorithm Based on the Unscented Kalman Filter," Fourth International Conference on Computational and Information Sciences, 2012.
- [4] P. Wu<sup>1</sup>, X. Li<sup>2</sup>, L. Zhang<sup>1</sup>, and Y. Bo<sup>1</sup>, "Tracking Algorithm With Radar And Infrared Sensors Using a Novel Adaptive Grid Interacting Multiple Model," Published in IET Science, Measurement and Technology, Accepted on 4th, February 2014.
- [5] Z. H. U. Anfu, Zhanrong, Y. LI, and Z. CAO, "Data Fusion of Infrared and Radar for Target Trackin," IEEE, 2008.
- [6] S. M. Kay, "Fundamentals Of Statistical Signal Processing Estimation Theory," pp. 419-476, 1993.
- [7] A. Steinberg and C. Bowman, "Revisions to the JDL Data Fusion Model," in Handbook of Multi sensor Data Fusion, 2nd ed., M. Liggins, D. Hall, J. Llinas, CRC Press, 2008.
- [8] Y.-k. Xu and X.-G. Liang, "Information Fusion for Radar/Infrared Compound Seeker based on Federated Filter," 2011.
- [9] P. Zhizhuan, F. Jinfu, W. Youli, T. Zand, and L. Xiaolon, "Data Fusion Approach with MMW Radar and IR Sensor Based on MEKF," International Conference on Mechatronics and Automation August 5 - 8, 2007.
- [10] R. R. Jitendra, "Multi-sensor data fusion with MATLAB," pp. 13-40, 2010.
- [11] X. Sun and G. Yan, "Weighted Measurement Fusion Fractional Order Kalman Filter," International Workshop on Information and Electronics Engineering (IWIEE), 2012.

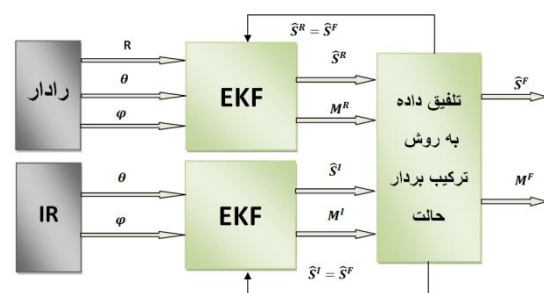
فیدبک باعث کاهش خطای تلفیق زاویه سمت در شرایط بدون اختلال نویزی می شود.



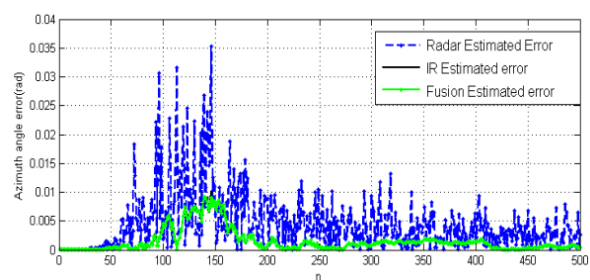
شکل (۱۴): نمودار خطای تلفیق زاویه سمت با روش فیدبک (برای حسگر IR)

## ۷-۳-۲- استفاده از روش فیدبک برای هر دو حسگر

چنانچه روش فیدبک مطابق شکل (۱۵) برای هر دو حسگر اعمال گردد (که شامل اطلاعات بهبود یافته زاویه سمت و زاویه ارتفاع و اطلاعات برد می باشد) نمودار حاصل از شبیه سازی به صورت شکل (۱۶) می باشد.



شکل (۱۵): استفاده از روش فیدبک برای هر دو حسگر



شکل (۱۶): خطای تلفیق تلفیق زاویه سمت با روش فیدبک برای دو حسگر

در شکل (۱۷)، نمودار خطای تلفیق در حالت بدون فیدبک، فیدبک برای حسگر IR و فیدبک برای هر دو حسگر آمده است. همان طور که مشاهده می شود خطای تلفیق در حالتی که فیدبک به هر دو حسگر اعمال می شود، کم ترین مقدار را دارد.



- [12] Q. Gan and C. J.Harris, "Comparison of two Measurement Fusion methods for K.Filter Based Multisensor data Fusion," IEEE transaction on Aerospace and Electronic sys. vol. 37, no. 1, pp. 273-280, January 2001.
- [13] B. Khaleghi, A. Khamis, F. O. Karray, and S. N. Razavi, "Multi-sensor Data Fusion: A Review of the State-of-the-Art," Elsevier, Information Fusion, pp. 28-44, 2013.
- [14] E. Sayed, E. Badawy, T. Reda, A. ElShahid, and A. E. Din Sayed Hafez, "A Real Time 3D Multi Target Data Fusion for Multistatic Radar Network Tracking," PIERS Proceedings, Guangzhou, China, August 2014.
- [15] P. Zhizhuan, F. Jinfu, W. Youli, T. Zand, and L. Xiaolon, "Data Fusion Approach with MMW Radar and IR Sensor Based on MEKF," International Conference on Mechatronics and Automation, August 2007.



---

## Designing Radar and IR Sensors Data Fusion System for Target Tracking in Noise Jamming Conditions

R. Gholami, M. Okhovat\*

\*Imam Hossein University

(Received: 21/11/2015, Accepted: 31/10/2016)

### ABSTRACT

*Enhancing accuracy and intelligence of military equipment and systems are of the most important priorities in defense complexes. Data fusion of different sensors for target tracking is a basic requirement in military and civilian domains. Since received data from sensors is most of the time with great ambiguity and therefore causes trouble with decision making for military commanders especially in confrontation with jammers, considering various aspects of target and operating environment can be of great help. In this paper, by using the extended Kalman filter; state vector estimation and minimum MSE matrix will be computed as the central processor entries through each of these sensors and their fusion will be carried out by measurement fusion methods. Afterwards, by application of noise jamming on each of the mentioned methods, the effect of data fusion on the noise jamming condition will be evaluated. Simulation results demonstrate that with designing data fusion system of radar and IR sensors for target tracking in noise disturbance condition, tracking the target can be performed in spite of jamming and it would assist military commanders in decision making.*

**Keywords:** Radar, IR, Data fusion, Kalman filter, Noise Jamming