

تطبیق کواریانس تخمین در الگوریتم ردگیری تنها با سمت اهداف متحرک سطحی در فیلترهای چندمدله

مهدی اردشیری^۱، دانشجوی دکتری؛ علیرضا الفی^۲، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و رباتیک - دانشگاه صنعتی شاهرود- شاهرود- ایران - ardeshiri_mahdi@shahroodut.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و رباتیک - دانشگاه صنعتی شاهرود- شاهرود- ایران - a_alfi@shahroodut.ac.ir

چکیده: در این مقاله الگوریتمی جهت ردگیری هدف با داده‌های سمت به‌تنهایی به روش بازنشانی کواریانس فیلتر پیشنهاد می‌شود. رویت‌پذیری ضعیف در مساله ردگیری سمت به‌تنهایی عموماً منجر به واگرایی فیلتر یا خطای بایاس می‌شود. در این حالت به‌دلیل یکتانبودن جواب مساله، مقدار کواریانس فیلتر، شرط کافی برای خطای تخمین نمی‌باشد. در این مقاله نشان داده می‌شود که اثرات متقابل باندکرامر-رائو و کواریانس خطای تخمین برد هدف، جهت تشخیص واگرایی فیلتر بازگشتی، مشابه یک تابع پایداری لیپانوف، عمل می‌کند. در ادامه، این تابع به‌عنوان ضریب تصحیح تطبیق کواریانس تخمین استفاده می‌شود. همچنین برای تخمین برد اولیه هدف و محاسبه صحیح باندکرامر-رائو، فیلترچندمدله/ذره‌ای به‌کار برده می‌شود. به روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، الگوریتم پیشنهادی با سایر فیلترها، براساس معیارهای رایج مقالات مقایسه شده و بهبود نتایج تخمین برد هدف، خاصه در زمان کاهش رویت‌پذیری نشان داده می‌شود. تمامی بررسی‌های انجام‌شده برای یک مساله کاربردی ردیابی شناورهای سطحی با حساسه صوتی غیرفعال یک زیردریایی محدود شده‌است.

واژه‌های کلیدی: ره‌گیری سمت به‌تنهایی، رویت‌پذیری هدف، تطبیق کواریانس، ماتریس اطلاعات فیشر، باند پایین کرامر-رائو، مسیر بهینه رویت گر.

Matching of the estimating covariance in bearings-only tracking algorithm for moving surface targets in multiple model filters

Mahdi Ardeshiri ¹, PhD student; Alireza Alfi ², Associate Professor

¹Faculty of Electrical and Robotic, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, Email: ardeshiri_mahdi@shahroodut.ac.ir

²Faculty of Electrical and Robotic Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, Email: a_alfi@shahroodut.ac.ir

Abstract: In this paper, an algorithm for bearings-only target tracking (BOT) problem is proposed using the resetting of the covariance matrix of the filter. Poor observability in BOT problem often leads to a bias error or even divergence of the filter. Therefore, due to non-uniqueness of the problem, the covariance value of the filter is not a sufficient condition to indicate the estimation error. In this paper, it is shown that the mutual effects between the covariance of the target range estimation and the Cramer-Rao lower error bound is similar to the stability of a Lyapunov function for detecting the divergence of the recursive filter. Then, this function is used as a correction coefficient of the estimating covariance matching. The multi-model/particle filters are also adopted for estimating the initial range of the target and calculating the Cramer-Rao lower error bound. Using the Monte Carlo simulation method, the proposed algorithm is compared with other conventional filters based on the criteria reported in the literature. Improvement of the results of the target range estimation is also shown, especially in case of observability reduction. All studies conducted in this paper are limited to the problem of surface floats tracking with passive sonar for a typical submarine.

Keywords: Bearings-only tracking, target observability, fisher information matrix, cramer-rao lower band, optimal observer path planning.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۳۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۲۱ و ۱۳۹۷/۰۸/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۲۰

نام نویسنده مسئول: علیرضا الفی

نشانی نویسنده مسئول: دانشکده مهندسی برق و رباتیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

۱- مقدمه

ردگیری اهداف در شرایطی که محدودیت اندازه‌گیری پارامترهای هدف با حساسه‌های فعال وجود دارد، فقط با اندازه‌گیری زاویه سمت اهداف توسط حسگرهای غیرفعال انجام می‌پذیرد که با عنوان ره‌گیری سمت به‌تنهایی (BOT)^۱ شناخته می‌شود و کاربردهای زیادی خاصه در صنایع نظامی و صنعتی دارد. مساله BOT با توجه به تعداد و موقعیت حساسه‌ها، تعداد اهداف و ابعاد حرکتی اهداف دسته‌بندی شده‌است.

در چهل سال اخیر BOT و تحلیل حرکت هدف (TMA)^۲ موضوع مورد علاقه محققین بوده‌است. این موضوع در مسائل اکوستیکی (زیردریایی که سونار غیرفعال دارد)، تجهیزات الکترومغناطیسی (مراقب های با حسگرهای ESM^۳) و تجهیزات اپتیکی (در ماهواره‌ها و دوربین های مادون قرمز) استفاده می‌شود [۲، ۱]. تحقیقات زیادی در خصوص انواع مساله BOT انجام شده که نتایج آن در مراجع اصلی [۵، ۴] عنوان شده‌است. نسخه استاندارد تحلیل حرکت سمت به‌تنهایی (BOTMA) شامل دو متحرک در یک سطح دوبعدی است که ناظر (تعقیب‌کننده) و هدف با سرعت شبه‌خطی با سرعت و جهت ثابت در طول زمان ره‌گیری حرکت می‌کنند. بدین ترتیب منظور از مساله BOT، محاسبه چهار پارامتر برد، سمت، سرعت و کورس (جهت حرکت) هدف است که تنها با جمع آوری زاویه سمت مشاهده^۴ هدف توسط حساسه ناظر انجام می‌پذیرد. برخی موارد کاربردی، ردگیری زاویه نسبی حرکت هدف با استفاده از تجهیزات مراقبت تصویری مدنظر است که در این‌گونه مسائل استخراج مدل دینامیکی و تخمین برد و سرعت هدف مدنظر نیست [۳]. مسائل BOT در حالت کلی غیرخطی و به فرم رابطه (۱) است.

$$\begin{aligned}\dot{X} &= f(X, w) \\ Z &= h(X, v)\end{aligned}\quad (1)$$

که در آن Z, X بردارهای حالت و اندازه‌گیری، w نویز بردار حالت هدف، v نویز اندازه‌گیری و f, h به ترتیب توابع حالت و اندازه‌گیری مدل هدف می‌باشند که بنا بر نوع دستگاه مختصات در مدل‌سازی مساله ممکن است غیرخطی و نامعلوم باشند. در مراجع مختلف مزایا و معایب مدل‌سازی مساله BOT در دستگاه مختصات قطبی و کارتزین و مدل های بهینه آن، مقایسه شده‌است. مساله BOT در دستگاه مختصات قطبی بایاس کمتری نسبت به مختصات کارتزین دارد، هرچند در حالتی که اطلاعات کمتری از هدف وجود دارد، استفاده از فیلترهای اصلاح‌شده چندمدله^۵ در دستگاه قطبی و یا کارتزین توصیه شده‌است [۴]. مطابق یک فرض کلاسیک، چنان‌چه بردار سرعت ثابت باشد، ناظر نمی‌تواند هدف را شناسایی کند و مسئله رویت‌پذیر نیست. تعقیب هدف با مانور بهینه ناظر برای تحقق شرط رویت‌پذیری (محاسبه برد هدف از داده‌های اندازه‌گیری سمت آن) از الزامات اساسی مساله BOT است [۶، ۵]. مانور بالا موجب تولد نویزهای صوتی و آشکارپذیری بی‌شتر ناظر می‌گردد. با استفاده از تحلیل آمیختگی^۶ اندازه‌گیری داده‌های سمت هدف با دینامیک حرکت آن، مدل حرکت هدف تخمین زده می‌شود. رویت‌پذیری هدف در مساله BOT در مراجع زیادی بررسی شده‌است.

در مرجع [۵] مدل‌سازی ریاضی و تأثیر مانور ناظر در افزایش رویت‌پذیری به تفصیل مورد بحث قرار گرفته‌است. زمانی که آشکارپذیری قطعی است با توجه به همراه بودن نویز در اندازه‌گیری زاویه سمت، دقت BOT به مانور بهینه ناظر وابسته است. عموماً در کارهای ارائه‌شده در مراجع، با استفاده از معیار بیشینه ماتریس اطلاعات فیشر (FIM)^۷ توسط مانور ناظر، رویت‌پذیری افزایش می‌یابد [۶]. در برخی مراجع دیگر کمینه کواریانس تخمین و یا کمینه باند پایین کرامر- راثو (CRLB)^۸ به عنوان معیار بهینه استفاده می‌شود. در [۶] نشان داده شده که بیشینه رویت‌پذیری مساله BOT، از تعامل دو شرط متقابل، یعنی کاهش فاصله ناظر تا هدف و حرکت متعامد ناظر بر خط دید هدف، محقق می‌گردد. در بسیاری از مسائل کاربردی BOT، موقعیت و شرایط اولیه هدف نامعلوم است، لذا به دلیل پارامترهای نامعلوم توابع اندازه‌گیری غیرخطی در مساله BOT، استفاده از رویت‌گر تطبیقی کارآمد نیست [۷]. عمده مراجع اصلی کنترل مانور مسیر بهینه مساله BOT، برای اهداف ساکن یا متحرک با سرعت و جهت حرکت معلوم انجام شده‌است [۸-۱۰]. در [۱۱] برای یافتن مسیر بهینه BOT، از روش بهینه‌سازی مستقیم به کمک چندجمله‌ای های متعامد چبی شف استفاده شده‌است.

الگوریتم فیلترکالمن توسعه یافته با خطی‌سازی سیستم غیرخطی و تقریب مرتبه اول بسط تیلور، دینامیک حالت هدف را تخمین می‌زند. عموماً در روش‌های فیلترکالمن، نویز سیستم و اندازه‌گیری با توزیع نرمال و میانگین صفر فرض می‌شود. کارآمدی^۹ و سازگاری^{۱۰} و البته برخی الزامات پایداری فیلتر [۱۲] وابسته به تنظیم کواریانس نویز دینامیک سیستم (Q) و کواریانس نویز اندازه‌گیری (R) می‌باشد که عمدتاً در مراجع مختلف با استفاده از مانده نمونه‌برداری تخمین زده می‌شوند [۵]. نکته حائز اهمیت این است که در مسائل کاربردی عموماً محدودیت در مسیر حرکت ناظر منجر به کاهش رویت‌پذیری و درنهایت واگرایی فیلترهای BOT با انحراف به جواب نادرست (بایاس فیلتر) می‌گردد. در برخی موارد در ادامه ردگیری چنان‌چه رویت‌پذیری مجدداً افزایش یابد، ممکن است به دلیل میرایی کواریانس تخمین و کاهش بهره فیلتر (حتی با افزایش کواریانس تخمین)، هم‌گرایی به جواب واقعی امکان‌پذیر نباشد و فیلتر دچار زوال گردد. در صورتی که کواریانس تخمین $(P_{k|k})$ به سمت جواب غیرواقعی میرا گردد، نمی‌تواند واگرایی یا بایاس فیلتر از جواب واقعی را نشان دهد. در ره‌گیری فعال هدف با رادار، ماتریس کواریانس تخمین و مانده نمونه برداری (مانده خطا^{۱۱}) می‌تواند بیان‌گر اندازه بیضی‌گون خطا و میزان هم‌گرایی/ واگرایی یا بایاس فیلتر باشد [۵]، لیکن در مسائل BOT با کاهش رویت‌پذیری، معیاری برای تشخیص واگرایی و یا بایاس فیلتر به صورت برخط معرفی نشده‌است. به طور خلاصه در مساله BOT برای هم‌گرایی فیلتر شروط زیر مورد نیاز می‌باشد [۱۲]:

۱- تحقق رویت‌پذیری مساله تا فیلتر به جواب یکتا هم‌گرا گردد که در این خصوص الزاماً ناظر بایستی مانور کند [۶].

جلوگیری از زوال فیلتر، از ضریب محوشدگی^{۱۷} تطبیقی (روش ESTF^{۱۸}) [۱۸] استفاده می‌گردد. کاربرد این روش به منظور حفظ سازگاری فیلتر، بعد از بهبود شرایط رویت‌پذیری است. به دلیل دشواری ارائه اثبات تحلیلی، بهینه‌سازی انجام‌شده به روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو در سناریوهای ممکن در تعقیب اهداف دریایی ارزیابی می‌شود. به طور خلاصه، هدف این مقاله معرفی یک فیلتر بهینه برای مساله BOT در شرایط کاهش رویت‌پذیری به شرح نوآوری‌های زیر می‌باشد:

الف: پیشنهاد معیار جدید برای تشخیص ناپایداری و بایاس BOT.

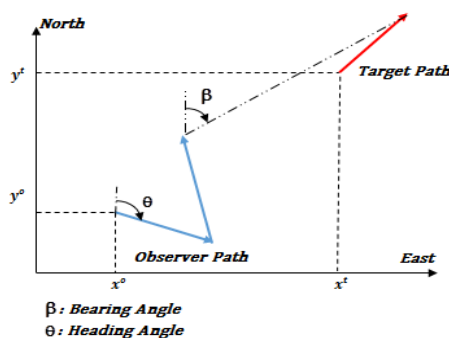
ب: توسعه فیلتر تطبیقی به روش گرادیان نزولی در فیلترهای IMM.

ج: توسعه فیلتر تطبیقی ESTF در مساله BOT با بازنشانی کواریانس تخمین به کمک معیار پیشنهادی تشخیص واگرایی.

در ادامه، در بخش ۲ مساله BOT، مدل‌سازی تخمین IMM-EKF و نحوه محاسبه معیارهای باند پایین خطای کرامر-رائو معرفی می‌شود. در بخش ۳ تابع لیاپانوف برای تشخیص واگرایی BOT معرفی و ارزیابی می‌گردد. در بخش ۴ با بهره‌گیری از معیار پیشنهادی، الگوریتم بهینه‌سازی در شرایط واگرایی و بایاس مساله BOT ارائه و در سناریوهای مختلف (به روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو) ارزیابی می‌شود. بخش ۵ به جمع‌بندی و پیشنهاد ادامه کار اختصاص دارد.

۲- تعاریف و مدل‌سازی مساله BOT

مساله عمومی BOT تخمین مسیر حرکت هدف (سرعت و برد هدف) با اندازه‌گیری داده‌های حساسه سمت آغشته به نویز، توسط یک ناظر در حال مانور (حامل حساسه) تعریف می‌شود. در ادامه برای تعریف ریاضی مساله BOT هدف به اسرعت ثابت (بدون مانور)، از دستگاه مختصات کارترین استفاده شده‌است. شکل ۱ هندسه دوبعدی مساله BOT را نشان می‌دهد [۱۴].



شکل ۱: هندسه دو بعدی مساله BOT [۱۴]

مدلسازی مساله BOT در دستگاه کارترین با بردار نسبی حرکت هدف شامل موقعیت و سرعت در حالت گسسته و نمونه‌برداری در لحظه k به شکل زیر تعریف می‌شود [۴]:

$$X_k^t = \begin{bmatrix} x_k^t & y_k^t & \dot{x}_k^t & \dot{y}_k^t \end{bmatrix}^T : V_t \text{ بردار حالت حرکت هدف با سرعت خطی}$$

$$X_k^o = \begin{bmatrix} x_k^o & y_k^o & \dot{x}_k^o & \dot{y}_k^o \end{bmatrix}^T : V_o \text{ بردار حالت حرکت ناظر با سرعت خطی}$$

۲- تخمین پارامترهای نامعلوم اولیه هدف. در مسائل کاربردی معمولاً برد هدف نامعلوم است و بایستی در ابتدای مانور تخمین زده شود. عموماً برای تخمین شرایط اولیه استفاده از فیلتر ذره‌ای مرسوم است [۴]. همچنین برای کاهش حجم محاسبات در ره‌گیری اهداف ثابت روش‌های پارامتریزه کردن فاصله و در اهداف متحرک استفاده از فیلترهای موازی [۱۳، ۱۴] و مدل‌های توسعه‌یافته آن [۱۵] توصیه شده‌است. در این مقاله به منظور تخمین سریع شرایط اولیه از روش توسعه‌یافته فیلترهای چندمدله کالمن مرتبه ۲ (IMM-UKF^{۱۹}) ارائه‌شده در [۱۴] استفاده می‌شود. علاوه بر این، عمل کرد روش پیشنهادی با فیلترهای کالمن توسعه‌یافته (EKF^{۲۰}) و فیلترهای چندمدله توسعه‌یافته (EKF-IMM) و همچنین فیلترهای ذره‌ای (PF^{۲۱}) مقایسه می‌شود.

۳- سازگاری فیلتر که به معنی تنظیم مناسب کواریانس نویز دینامیک حرکت و کواریانس نویز اندازه‌گیری حساسه است [۵] و عدم تحقق آن موجب ناپایداری تخمین می‌گردد [۱۶]. در مراجع مختلف، استفاده از فیلترهای تطبیقی جهت به‌روزرسانی کواریانس نویز فیلتر به منظور حذف بایاس نویز تخمین (به دلیل مشتق‌گیری از نویز گوسی در خطی‌سازی مدل) رایج است. در [۱۷]، ضمن مقایسه روش‌های مختلف فیلترهای تطبیقی در مساله BOT، یک روش بازگشتی بهینه ارائه شده‌است. در این روش درایه‌های ماتریس کواریانس نویز R و Q فیلتر کالمن (به روش شدیدترین فرود^{۲۲})، با تابع هزینه کواریانس مانده نمونه‌برداری تطبیق می‌یابد. در این مقاله جهت سازگاری فیلتر پیشنهادی، روش ارائه‌شده این مرجع در فیلترهای IMM توسعه داده شده‌است.

۴- تنظیم کواریانس تخمین با تشخیص واگرایی یا بایاس فیلتر.

این امر در فیلترهای ردگیر معمول با بررسی تغییرات کواریانس تخمین حالت ($P_{k|k}$) یا کواریانس مانده‌ها انجام می‌پذیرد. لیکن در مساله BOT این روش به دلیل عدم حضور حساسه اندازه‌گیر برد هدف کارساز نیست. در صورت کاهش رویت‌پذیری مساله BOT، کواریانس تخمین فیلتر نامعتبر می‌گردد (به واسطه وجود پارامترهای نامعلوم و نویز بالای اندازه‌گیری، خاصه در ره‌گیری زیرسطحی با حساسه سونار). در این حالت فیلتر ممکن است از جواب اصلی واگرا شده یا برای مدت طولانی دارای بایاس باشد. همان‌طور که اشاره شد در مساله BOT، روش‌های مختلفی برای تطبیق کواریانس نویز و اندازه‌گیری ارائه شده‌اند، لیکن این روش‌ها در تطبیق کواریانس تخمین کارآمد نمی‌باشند. در این مقاله پس از معرفی معیاری برای تشخیص برخط ناپایداری فیلتر، الگوریتمی بهینه به منظور بازنشانی و سپس تطبیق مناسب کواریانس تخمین ارائه می‌شود. ابتدا با بهره‌گیری شهودی از رفتار باند کرامر-رائو و ماتریس مشاهدات هدف در فیلترهای بدون بایاس، تابع پایداری لیاپانوفی برای بررسی ناپایداری فیلترهای بی‌بیز^{۲۳} معرفی می‌گردد. انحراف رفتار تابع پیشنهادی از فیلتر ایده‌آل، نرخ کاهش هم‌گرایی (ناپایداری فیلتر) را نشان می‌دهد. در ادامه، بازنشانی باند پایین کواریانس فیلتر به منظور کنترل شرایط رویت‌ناپذیری و ناپایداری پیشنهاد می‌شود و در انتها برای

ساختار مدل $M_k \in \{M_k^j\}$ و تابع احتمال نویز سیستم می تواند از مدلی به مدل دیگر متفاوت باشد.

تبدیل مدل های سیستم در هر گام زمانی، رفتار مدل مارکوف مرتبه اول را دارد. به این معنی که پرش مدل i ام سیستم در لحظه k ام فقط به مدل j ام آن سیستم در لحظه ای $k-1$ وابسته است و احتمال تبدیل هر مدل به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$p_{ij} = \Pr\{M_k^j | M_{k-1}^i\} \quad (6)$$

که در آن p_{ij} درایه های ماتریس انتقال براساس دانش تجربی از احتمال سوئیچ بین مدل های سیستم انتخاب می شود.

تنظیم شرایط اولیه فیلترها با روش پارامتریزه کردن بازه ره گیری برای مقادیر اولیه ماتریس کواریانس خطا $P^i(x_0)$ ، با بردار حالت اولیه $\hat{X}_{0|0}^i$ مدل i ام و فرض برابری احتمال شرطی پرش هر مدل (به صورت $\mu_{0|0}^{ij} = 1/M$) انجام می گیرد.

سپس الگوریتم تخمین IMM در هر بازه نمونه برداری زاویه سمت هدف به شرح ذیل در هر گام تکرار می گردد:

۱- ترکیب معادلات و کواریانس حالت^{۱۹} برای تنظیم فیلتر مدل M_k^j :

$$\hat{X}_{k-1|k-1}^{0j} = \sum_{i=1}^r \hat{X}_{k-1|k-1}^i \mu_{k-1|k-1}^{ij} \quad (7)$$

$$P_{k-1|k-1}^{0j} = \sum_{i=1}^r \mu_{k-1|k-1}^{ij} \cdot \left\{ P_{k-1|k-1}^i + \left[\hat{X}_{k-1|k-1}^i - \hat{X}_{k-1|k-1}^{0j} \right] \cdot \left[\hat{X}_{k-1|k-1}^i - \hat{X}_{k-1|k-1}^{0j} \right]^T \right\} \quad (8)$$

• تابع احتمال شرطی احتمال وقوع مدل j ام:

$$\mu_{k-1}^{ij} = \Pr\{M_{k-1}^i | M_k^j, Z_{k-1}\} = \frac{p_{ij} \mu_{k-1|k-1}^{(i)}}{\mu_{k|k-1}^{(j)}} \quad (9)$$

۲- به روز رسانی مدل M_k^j با EKF

• معادلات پیش بینی EKF برای هر مدل:

$$X_{k|k-1}^j = F_k^j \cdot \hat{X}_{k|k-1}^{0j} - U_{k-1,k} \quad (10)$$

$$P_{k|k-1}^j = F_k^j \cdot P_{k|k-1}^{0j} [F_k^j]^T + Q_k^j \quad (11)$$

ماتریس کواریانس نویز حالت مدل j ام:

$$Q_k^j = G_k^j W_k^j [W_k^j]^T [G_k^j]^T$$

• بهره EKF برای هر مدل:

$$K_k^j = P_{k|k-1}^j [\hat{H}_k^j]^T [\hat{H}_k^j P_{k|k-1}^j [\hat{H}_k^j]^T + R_k^j]^{-1} \quad (12)$$

• تخمین ماتریس مشاهدات حاصل از گردان بردار اندازه گیری به بردار حالت برای مدل j ام در لحظه k :

$$\hat{H}_k^j = \frac{dh(X_k)}{dX} \Big|_{X=\hat{X}_{k|k-1}^j} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{k|k-1}^j / \hat{r}^2 & -\hat{x}_{k|k-1}^j / \hat{r}^2 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

• به روز رسانی بردار تخمین و کواریانس خطا مدل j ام:

$$\nu_k^j = z_k - \hat{H}_k^j \hat{X}_{k|k-1}^j = z_k - \hat{\beta}_k \quad (14)$$

$$\hat{X}_{k|k}^j = \hat{X}_{k|k-1}^j + K_k^j \nu_k^j \quad (15)$$

بردار حالت حرکت نسبی هدف: $X_k = X_k^t - X_k^o = [x_k \ y_k \ \dot{x}_k \ \dot{y}_k]^T$ زاویه سمت واقعی هدف و اندازه گیری آن:

معادلات دینامیکی گسسته فضای حالت هدف با سرعت ثابت و با فرض نامعلوم بودن شتاب و اعمال آن به صورت نویز مستقل گوسی به فرم

$$W_k = [w_{x_k}, w_{y_k}]^T = [\ddot{x}_k, \ddot{y}_k]^T$$

$$X_{k+1} = F_k X_k + G_k W_k - U_{k,k+1}$$

$$F_k = \nabla_x f(x_k) \Big|_{x_k=\hat{x}_{k-1}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, G_k = \begin{bmatrix} \frac{T^2}{2} & 0 \\ 0 & \frac{T^2}{2} \\ T & 0 \\ 0 & T \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$U_{k-1,k} = \begin{bmatrix} u_{k1} \\ u_{k2} \\ u_{k3} \\ u_{k4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_k^o - x_{k-1}^o - T\dot{x}_{k-1}^o \\ y_k^o - y_{k-1}^o - T\dot{y}_{k-1}^o \\ \dot{x}_k^o - \dot{x}_{k-1}^o \\ \dot{y}_k^o - \dot{y}_{k-1}^o \end{bmatrix}$$

ماتریس انتقال حالت مدل در لحظه k برابر F_k معلوم است و بردار $U_{k,k+1}$ به طور دقیق با حساسه های ناوبری ناظر مانند GPS اندازه گیری می شود. همچنین معادلات غیرخطی بردار اندازه گیری زمان گسسته z_k با نویز اندازه گیری گوسی با میانگین صفر $v_k = N(0, R_k^j)$ عبارتست از:

$$z_k = h(X_k) + v_k = \beta_k + v_k \quad (3)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{x}{y} \right)$$

r_0 مقدار اولیه نامعلوم مساله BOT در نمونه برداری اولیه z_0 :

$$r_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \quad (4)$$

که در آن $x_0 = r_0 \cdot \sin(z_0)$ و $y_0 = r_0 \cdot \cos(z_0)$.

۲-۱- تخمین گرهای IMM برای مدل تخمین حالت شرطی در مساله BOT

مساله TMA در مختصات کارتزین برای معادلات اندازه گیری رابطه (۳) غیرخطی است. بنابراین، الگوریتم فیلترهای خطی کارآمد نیست. با توجه به ماهیت غیرخطی بودن، نامعلوم بودن شرایط اولیه، محدودیت در رویت پذیری هدف، انتخاب فیلتر مناسب برای مسئله BOT مورد بحث محققان بوده است. نتایج مراجع اصلی مساله BOT [۵]، انتخاب فیلترهای چندمدله (MM) را به واسطه نامعلوم بودن شرایط اولیه و دینامیک غیرخطی حرکت هدف توصیه می کنند. به دلیل اهمیت بهره گیری از فیلترهای IMM در این مقاله، روابط آن در ادامه آمده است [۶].

با انتخاب تعداد r مدل M در لحظه k ، بردار پیش بینی تخمین حالت $\hat{X}_{k+1|k}^j$ و کواریانس خطای $P_{k+1|k}^j$ در مدل j ام برابر است با:

$$X_k^j = f(k, M_k^j, X_{k-1}^j) + G(k, M_k^j) W_k^j \quad i, j = 1, \dots, r$$

$$z_k = h(k, M_k^j, X_k^j) + N(k, M_k^j) \quad (5)$$

ماتریس کواریانس خطا یک ماتریس نیمه‌معین مثبت است و برای یک تخمین‌گر کارآمد ناحیه عدم قطعیت مطابق رابطه زیر است که کاهش آن با افزایش FIM میسر می‌گردد:

$$A_{1\sigma} = \frac{\pi}{\sqrt{FIM}} \quad (23)$$

۳- معرفی معیاری جدید برای تشخیص نرخ واگرایی در مساله BOT

کواریانس تخمین و مانده خطا که معیار هم‌گرایی یا واگرایی فیلترهای عمومی ره‌گیری اهداف (خاصه در رادارها) می‌باشد، در مساله BOT کارآمد نیست، چون در زمان کاهش رویت‌پذیری و عدم یکتایی پاسخ مساله، نمی‌تواند مبین انحراف از جواب فیلتر باشد. تاکنون معیار مشخصی برای تشخیص نرخ واگرایی در مسائلی همچون BOT ارائه نشده‌است. در این بخش با بهره‌گیری از باند کرامر-رائو و هم‌بستگی آن با کواریانس خطای تخمین، معیاری برای تشخیص واگرایی پیشنهاد می‌شود. بدین‌منظور برای تشخیص هم‌گرایی فیلتر با استفاده از رابطه (۲۲)، تابع مثبت معین رابطه (۲۴) به‌عنوان یک تابع لیاپانوف پایداری پیشنهاد می‌گردد. قطعاً این رابطه در زمانی که یک تخمین‌گر بدون بایاس و یا یک‌نوا کاهنده باشد، می‌تواند به‌عنوان معیار تشخیص کاهش خطای فیلتر استفاده شود.

$$V_k = \text{sgn}P_{k|k} - J_k^{-1} \geq 0 \quad (24)$$

کواریانس تخمین در فیلترهای بازگشتی به تدریج به سمت صفر میل می‌کند، همچنین افزایش رویت‌پذیری با افزایش FIM و کاهش معکوس آن (J^{-1}) همراه می‌گردد. لذا تحقق کران پایین نرخ تغییرات تابع V_k به‌عنوان شرط لازم هم‌گرایی فیلتر BOT در فیلتر IMM به شکل رابطه (۲۵) معرفی شده و در ادامه عمل‌کرد آن ارزیابی می‌شود.

$$\Delta V_k = \text{sgn}(V_k)(V_k^j - V_{k-1}^j) \leq 0 \quad (25)$$

برای بررسی رفتار تابع مذکور در شرایط مختلف عمل‌کردی فیلتر، شبیه سازی یک هدف سطحی دوبعدی دریایی با کواریانس نوین اندازه‌گیری زاویه سمت معادل ۱/۵ درجه و نوین دینامیک حرکت شبیه‌سازی شده معادل ۱۰۰ متر برای ۳ سناریوی حرکتی متفاوت با روش EKF بررسی می‌شود. سرعت ناظر و هدف در همه سناریوها معادل ۵ گره دریایی با کورس حرکتی ۲۲۰ درجه نسبت به شمال جغرافیایی و زمان ره‌گیری ۱۲۰۰ ثانیه انجام می‌شود. سایر پارامترها براساس تفاوت رویت‌پذیری هدف انتخاب می‌شوند. طراحی مانور بهینه ناظر را در [۱۶] ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها در شکل (F1) پیوست ۱ آمده‌است.

الف- مانور اول: حرکت دورشونده (زاویه دید هدف ۲۰۰ درجه) فاصله تا هدف ۵ کیلومتر.

این مانور به دلیل رویت‌پذیری پایین ناشی از دورشدن هدف از ناظر انتخاب شده‌است (عدم کاهش منحنی CRLB از ۵۰۰ متر از نمونه ثانیه ۶۰۰). این مساله حدود ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر مطابق منحنی ^{20}Rms شکل (F1-1) بایاس دارد که در منحنی تابع ΔV_k در شکل (F1-2)

$$P_{k|k}^j = [I_{4 \times 4} - K_k^j \hat{H}_{k+1}^j] P_{k|k-1}^j \quad (16)$$

که در آن $\hat{\beta}_k^j$ تخمین زاویه سمت و v_k^j مانده نمونه‌برداری می‌باشد. ۳- محاسبه احتمال وقوع هر مدل و به‌روزرسانی احتمال شرطی مدل‌ها:

$$\Lambda_k^j = \frac{1}{\sqrt{\det(2\pi S_k^j)}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} [v_k^j]^T [S_k^j]^{-1} v_k^j \right\} \quad (17)$$

$$\mu_{k|k}^j = \Pr\{M_k^j | Z_k\} = \frac{\mu_{k|k-1}^j \Lambda_k^j}{\sum_{i=1}^r \mu_{k|k-1}^i \Lambda_k^i} \quad (18)$$

۴- ترکیب نهایی بردارهای تخمین حالت و کواریانس تخمین:

$$\hat{X}_{k|k} = \sum_{j=1}^r \hat{X}_{k|k}^j \mu_{k|k}^j \quad (19)$$

$$P_{k|k} = \sum_{j=1}^r \mu_{k|k}^j \left\{ P_{k|k}^j + [\hat{X}_{k|k}^j - \hat{X}_{k|k}] [\hat{X}_{k|k}^j - \hat{X}_{k|k}]^T \right\} \quad (20)$$

۲-۲ معیار سنجش رویت‌پذیری مسیر حرکت ناظر

استفاده از معادلات شبه‌خطی سنجش رویت‌پذیری در توابع غیرخطی، برای بررسی یکتایی تخمین استفاده می‌شود، لیکن کیفیتی از رویت‌پذیری ارائه نمی‌دهد. افزایش دترمینان FIM یا کاهش عکس آن (CRLM) از معیارهای مرسوم رویت‌پذیری تخمین‌گرهای غیرخطی می‌باشند. در صورتی که معکوس FIM وجود نداشته‌باشد، سیستم مقدار ویژه معادل صفر داشته و رویت‌پذیر نمی‌باشد. بنابراین بیشینه FIM معیاری بهینه و مستقل از پارامترهای تخمین‌گر، برای بررسی رویت‌پذیری هدف است. رابطه کلی FIM در یک تخمین بدون بایاس برای دنباله اندازه‌گیری Z^k از نسبت مجذورگرادیان تابع احتمال شرطی دنباله اندازه‌گیری به بردار مسیر حالت $P(Z_k | X_k)$ تعریف می‌شود. با بهره‌گیری از مرجع [۴]، محاسبه نرخ ماتریس اطلاعات فیشر و ماتریس کرامر-رائو مدل زام معادل J_j^{-1} در فیلتر IMM به روش بازگشتی به شرح زیر است:

$$FIM = J_k^j = F_{k-1}^j J_k^j [F_{k-1}^j]^{-1} + \hat{H}_k^j [R_k^j]^{-1} [\hat{H}_k^j]^T \quad (21)$$

محاسبه دقیق و نرخ خط FIM وابسته به ماتریس $\hat{H}_k$ و تخمین بُرد هدف در رابطه (۱۳) تخمین‌گر می‌باشد. برای بالابردن احتمال محاسبه دقیق FIM در این مقاله از فیلتر IMM استفاده می‌شود. در حالت تخمین بدون بایاس رابطه اساسی باند پایین خطا (باند کرامر-رائو) و کواریانس خطای تخمین به شکل زیر است، که در تخمین ایده‌آل این رابطه به تساوی تبدیل می‌گردد [۴].

$$P_{k|k} = E \left\{ \left(\hat{X}_{k|k} - X_k \right) \left(\hat{X}_{k|k} - \hat{X}_k \right)^T \right\} \geq J_k^{-1} \quad (22)$$

نتیجه‌گیری دوم:

اگر نرخ تغییرات تابع V_k در مجاورت محور صفر مثبت نوسان شدید کند، فیلتر دارای بایاس خواهد بود و در صورت تداوم، این بایاس باقی می‌ماند و هیچ‌گاه به جواب واقعی هم‌گرا نمی‌شود. در صورتی که در یک بازه زمانی نرخ تغییرات تابع V_k مثبت باشد، فیلتر از جواب واقعی منحرف خواهد شد و در صورتی که در مجاورت محور صفر منفی نوسان نماید، تمامی شرایط پایداری مجانبی را دارا بوده و فیلتر به تدریج به جواب واقعی هم‌گرا می‌شود. بنابراین تابع پیشنهادی می‌تواند با تقریب مناسبی در حالت برخاسته برای تشخیص نرخ واگرایی، بایاس و هم‌گرایی مساله BOT استفاده شود. این نتایج در بخش بعد، با بهره‌گیری از پیش‌بینی میزان ناپایداری تابع پیشنهادی در فیلتر IMM، به یک BOT تطبیقی توسعه داده می‌شود.

۴- پیشنهاد بهینه‌سازی الگوریتم مساله BOT

۴-۱- بازنشانی کواریانس تخمین با معیار تشخیص واگرایی جواب

با بهره‌گیری از نرخ واگرایی تابع معرفی شده در بخش قبل، شرایط واگرایی یا بایاس فیلتر عمل کرد تخمین گر کنترل می‌شود تا افزایش کواریانس تخمین و همچنین نویز نمونه برداری باعث انحراف به جواب غیرواقعی نشود. لذا مناسب است در زمان پیش‌بینی واگرایی فیلتر از جواب واقعی (به کمک تابع معیار V_k)، بازنشانی و اصلاح میزان انحراف کواریانس تخمین، متناسب با نرخ رویت‌پذیری صورت پذیرد تا کران کواریانس تخمین (تحقق شرط پایداری) محدود و کنترل گردد. لذا در شرایط واگرایی نرخ تغییرات تابع V_k ، اصلاح کواریانس فیلتر $P_{k-1|k-1}^j$ به شکل رابطه زیر پیشنهاد می‌شود:

$$Correction_k^j = \text{sgn}(\Delta V_k) * V \leq 0 \quad (26)$$

$$P_{k-1|k-1}^j = P_{k-1|k-1}^{0j} - \gamma^j * Correction_k^j \quad (27)$$

در این رابطه γ^j ضریب تنظیم است که باتوجه به دامنه باند کرامر-رائو (نرخ رویت‌پذیری) انتخاب می‌شود. از طرفی، بازنشانی کواریانس ممکن است در برخی موارد موجب منفی شدن کواریانس اندازه‌گیری یا تخمین گردد. همچنین ممکن است به دلیل انتخاب کوچک‌تر از حد واقعی کواریانس تخمین و به تبع آن کم شدن بهره فیلتر، موجب زوال و غیرفعال شدن دائمی فیلتر شود و امکان بهبود تخمین بعد از بهبود شرایط رویت‌پذیری محقق نگردد. بنابراین برای کنترل شرایط ناهمگون و حفظ سازگاری فیلتر، رابطه (۱۶) با ضریب محوسازی λ_k^j بازنویسی می‌شود.

$$P_{k|k-1} = \lambda_k^j F_k^j . P_{k|k-1}^{1j} [F_k^j]^T + Q_k^j \quad (28)$$

برای تنظیم λ_k^j از روش تطبیقی ESTF مرجع [۱۸] استفاده می‌شود.

باتوجه به نوسانات بالای حول صفر مثبت از ثانیه ۳۰۰ تا ۱۲۰۰ قابلیت پیش‌بینی دارد.

ب- مانور دوم: حرکت نزدیک‌شونده (زاویه سمت هدف ۲۰ درجه) فاصله تا هدف ۷ کیلومتر.

این مانور به دلیل تقرب به هدف، نرخ رویت‌پذیری بالایی دارد (کاهش تدریجی منحنی CRLB در شکل (F1-3) تا مقدار صفر). لذا مساله BOT مطابق منحنی RMS در شکل (F1-3) به تدریج به خطای صفر هم‌گرا شده‌است. این امر در منحنی تابع ΔV_k در شکل (F1-4) با نوسانات بالای منفی در ثانیه ۷۵۰ تا ۹۵۰ و در ادامه به دلیل نوسانات کم در مجاورت محور صفر منفی قابل پیش‌بینی بوده‌است.

ج- مانور سوم: تقرب با نرخ پایین در مسیر نسبتاً موازی (زاویه سمت ۱۲۰ درجه) فاصله اولیه تا هدف ۹ کیلومتر.

افزایش اولیه رویت‌پذیری مطابق منحنی CRLB در شکل (F1-5) تا ۲۰۰ متر در ابتدای مسیر و کاهش آن در ثانیه ۴۰۰ تا ۲۵۰ متر و کاهش نامحسوس و پایدار آن تا انتهای مانور مسیر تا ۲۰۰ متر ملاحظه می‌گردد. هرچند کواریانس فیلتر بر CRLM تقریباً منطبق است، لیکن RMS ردگیری در شکل (F1-5) پس از گذر از خطای صفر در ثانیه ۴۰۰ با نرخ ثابتی تا ۱۰۰۰ متر از مقدار واقعی منحرف شده‌است. پس از کاهش خطا در ثانیه ۵۰۰ تا انتهای مسیر، انحراف منحنی RMS تا ۱۵۰۰ متر ادامه می‌یابد. تابع ΔV_k در شکل (F1-6) با نوسانات بالای منفی در ثانیه ۴۰۰ تا ۵۰۰ نشان از بهبود هم‌گرایی در تخمین دارد، حال آن‌که نوسانات صفر مثبت در ثانیه‌های ۶۰۰ تا ۱۲۰۰ گویای ادامه انحراف منحنی RMS تا انتهای مسیر بوده‌است. باتوجه به بررسی‌های انجام شده برای تشخیص واگرایی خطا، بایاس و هم‌گرا شدن مساله BOT مطابق معیار پیشنهادی نتایج زیر حاصل می‌گردد.

نتیجه‌گیری اول:

نرخ بالای تغییرات منفی تابع V_k در زمان‌های اولیه با پاسخ زمانی سریع (فراجش بالا) می‌تواند مبین هم‌گرایی سریع در زمان‌های اولیه باشد. در این لحظه بردار تخمین در لحظات نخست می‌تواند به سمت شرایط اولیه هم‌گرا شود. این موضوع در بازنشانی فیلترهای ذره‌ای یا کاهش ابعاد فیلترهای چندگانه مفید است. در صورتی که زمان پاسخ بحرانی شود، امکان هم‌گرایی جواب در لحظات اولیه تخمین کمتر می‌گردد. اگر پاسخ زمانی نرخ تغییرات تابع V_k به مجاورت محور صفر منفی میرای شدید شود، نشان از رویت‌پذیری کمینه مسیر دارد و امکان قرارگرفتن در یک جواب نامعتبر یا واگرایی وجود دارد. لذا ممکن است در ادامه مسیر هیچ‌گاه تخمین به جواب واقعی هم‌گرا نگردد. در صورتی که تغییرات تابع V_k مثبت شود، بدیهی است که فیلتر از جواب واقعی منحرف شده‌است.

می‌شود. بنابراین، علاوه بر حفظ سازگاری فیلتر، تحقق شرط کرانداربودن کواریانس تخمین مهیا می‌گردد. لازم به ذکر است روش پیشنهادی به دلیل ماهیت تابع تشخیص واگرایی که از همبستگی داده‌های اندازه‌گیری و کواریانس فیلتر بهره‌گیری می‌نماید، برای کنترل تخمین گر در شرایطی کاهش رویپذیری موثر عمل می‌نماید. البته محاسبه تابع معیار واگرایی وابسته به محاسبه برخط ماتریس FIM است که بایستی از ابتدای تخمین با تشخیص شرایط اولیه هدف و در ادامه تخمین به طور صحیح انجام پذیرد. همچنین خطی‌سازی تابع اندازه‌گیری هدف در رابطه (۱۳) در محاسبه روش بازگشتی FIM در رابطه (۲۱) اهمیت دارد. لذا در این مقاله برای کاهش خطای تنظیم اولیه هدف از فیلترهای چندگانه و پارامتریزه کردن برد ره‌گیری هدف بهره‌گیری می‌شود. همچنین به منظور کنترل شرایط خطی‌سازی فیلتر EKF از فیلتر غیرخطی UKF که از توزیع ذره‌ای تابع اندازه‌گیری حول نقاط جواب بهره‌گیری می‌نماید، استفاده می‌شود [۱۹].

$$\lambda_k^j = \begin{cases} \alpha c_k^j & c_k^j \geq 1 \\ 1 & c_k^j < 1 \end{cases}$$

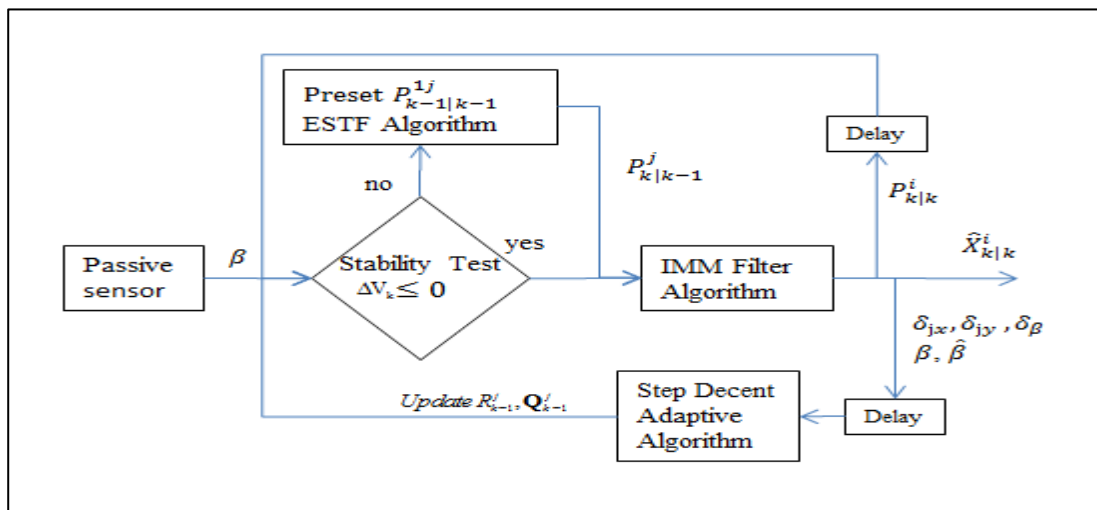
$$c_k^j = \frac{\text{tr}[N_k^j]}{\text{tr}[\alpha M_k^j]}$$

$$N_k^j = V_k^j - \kappa R_k^j - H_k^j Q_k^j H_k^{jT}$$

$$M_k^j = H_k^j F_k^j P_{k|k-1}^j [F_k^j]^T [H_k^j]^T \lambda_k^j$$

$$V_k^j = \begin{cases} v_{k-1}^j [v_{k-1}^j]^T, & k=0 \\ \frac{[\rho V_{k-1}^j + v_{k-1}^j [v_{k-1}^j]^T]}{1+\rho}, & k \geq 1 \end{cases}$$

اهمیت این روش، تطبیق کواریانس تخمین با ضریب تطبیق متناسب با نسبت انحراف مانده‌ها و کواریانس فیلتر می‌باشد. شکل (۲) الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. به این منظور هم‌زمان با تطبیق کواریانس نویز حالت و اندازه‌گیری با الگوریتم گرادیان نزولی در مرجع [۱۷]، بازنشانی کواریانس تخمین در صورت واگرایی آن از باند خطای مجاز فیلتر انجام



شکل ۲: الگوریتم پیشنهادی بهینه مساله BOT

UKF، IMM UKF، EKF) مطابق سه مانور بخش قبل در شکل (F2) پیوست ۱ آمده‌است. در این بخش برای مقایسه میزان بهبود مساله BOT، فیلتر EKF بخش قبل نیز تکرار شده‌است. پارامترهای تطبیق معادل $\lambda_k^j = 1$ ، $\kappa = 1.2$ ، $\alpha = 80$ و پارامترهای شبیه‌سازی هدف (نویز اندازه‌گیری و نویز حالت) مشابه سناریوهای قسمت قبل انتخاب می‌شود. الف- سناریوی اول: حرکت دورشونده (زاویه سمت هدف ۲۰۰ درجه) فاصله تا هدف پنج کیلومتر.

خطای تخمین در شکل F2-1 فیلتر پیشنهادی پس از تشخیص واگرایی در دقایق اولیه (قبل از ثانیه ۱۰۰) باعث کنترل کامل هم‌گرایی فیلتر و کاهش خطای کمتر از ۱۰۰ متر از ثانیه ۴۰۰ تا انتهای مانور شده‌است. ملاحظه می‌شود در این مانور کاهش رویپذیری (به علت دورشدن هدف)، نتوانسته است موجب افزایش بایاس فیلتر شود. سایر فیلترهای IMM عمل کرد موفق نداشته و تنها مقدار کمی بهبود از ثانیه

۲-۴ ارزیابی الگوریتم پیشنهادی در مساله کاربردی دریایی

در این بخش به منظور بررسی عمل‌کرد روش پیشنهادی، شبیه‌سازی مانورهای بخش قبل مجدداً با روش‌های بهینه رایج در مراجع اخیر مقایسه می‌شود. بدین منظور روش پیشنهادی با فیلترهای چندمدله UKF ارزیابی می‌گردد. همچنین به منظور حذف ناسازگاری فیلترهای مورد مقایسه و تطبیق صحیح کواریانس R_k^j و Q_k^j در هرگام از روند ارائه شده در [۱۷] استفاده می‌شود که به دلیل عدم ارتباط با هدف اصلی موضوع مقاله و حجم روابط بالای آن از ذکر آن‌ها صرف‌نظر می‌شود. این مقایسه به دلیل بررسی تأثیر روش پیشنهادی با یک فیلتر بهینه سازگار چندمدله انتخاب شده‌است. همچنین همانند بخش قبل برای تولید مانور بهینه متناسب با کورس حرکتی هدف از مرجع [۱۶] استفاده شده‌است. نتایج مقایسه ۴ فیلتر (۱- الگوریتم پیشنهادی، ۲- Adaptive IMM

(۳۲) و (۴) معیار ریشه زمانی میانگین متوسط خطا (RTAMS) برای عمل کرد زمانی تخمین به شکل رابطه (۳۳)، نام برد. این معیارها برای مقایسه عمل کرد فیلترهای مختلف در حالت شبیه سازی استفاده می شود [۵].

$$\text{CRLB}(\text{RMS}_k) = \sqrt{\mathbf{J}_k^{-1}(\mathbf{x}) + \mathbf{J}_k^{-1}(\mathbf{y})} \quad (30)$$

$$\text{RMS}_k = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\hat{x}_k^i - x_k^i)^2 + (\hat{y}_k^i - y_k^i)^2} \quad (31)$$

$$\eta_k = (\text{CRLB}(\text{RMS}_k)) / (\text{RMS}_k) * 100\% \quad (32)$$

$$\text{RTAMS} = \sqrt{\frac{1}{(t_f - t_1)M} \sum_{k=t_1+1}^{t_f} \sum_{i=1}^M (\hat{x}_k^i - x_k^i)^2 + (\hat{y}_k^i - y_k^i)^2} \quad (33)$$

در این قسمت کارآمدی روش پیشنهادی در مساله کاربری BOT در ره گیری اهداف دریایی سطحی مورد ارزیابی قرار داده شده است. بدین منظور محاسبه مسیر رویت پذیر در بازه ۲ تا ۱۰ کیلومتر، با سرعت ثابت هدف و ناظر معادل ۱۰ گره دریایی در زمان ۶۰۰ ثانیه با بیشینه محدوده دید سونار تا ۹۰ درجه نسبت به خط دید هدف و نرخ نمونه برداری حساسه سونار ۱ ثانیه انجام شده است. سایر پارامترهای نویز هدف شبیه سازی شده و حساسه مانند مثال ۱ در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه سازی جداول ۱-۱ تا ۳-۱ پیوست ۱ نشان می دهد الگوریتم پیشنهادی در تمامی فواصل سناریوهای مختلف عمل کرد بهتر یا برابری با سایر فیلترهای بهینه داشته است. برای بررسی جامع تر در این قسمت پنج فیلتر به ترتیب زیر شبیه سازی شده است.

(۱) الگوریتم پیشنهادی، IMM UKF (۲)

(۳) Adaptive IMM UKF (۴)، IMM UKF (۵) و EKF

بررسی نتایج جدول ۱ نشان می دهد فیلترهای بهینه ۳ و ۴ در مانورهای نزدیک شونده کارآمدی مناسبی دارند و در مانورهای دور شونده به تدریج کارآمدی آنها تا ۸۰٪ کاهش یافته است. استفاده از فیلترهای ذره ای چندمدلی (Particle IMM) هر چند حجم محاسبات را افزایش می دهد، لیکن توانسته است در برخی موارد در شرایط کاهش رویت پذیری تا ۱۴٪ کارآمدی فیلترهای IMM را بهبود دهد (جدول ۱-۱ برد ۱۰ Km). در مقابل ملاحظه می شود معیار کارآمدی فیلتر در روش پیشنهادی در بدترین حالت رویت پذیری در اغلب موارد نسبت به سایر فیلترهای ارائه شده تا ۲۰٪ بهبود داشته است. این معیار رابطه مستقیمی در کنترل خطای تخمین در محدوده کمینه باند خطای کرامر-رائو (خطای فیلتر ایده آل) دارد.

خطای لحظه ای RMS و متوسط RTAMS در فیلتر EKF با کاهش رویت پذیری، در بیشتر سناریوها بالا است و در شرایط خطای بالاتر از ۱۰۰ متر باند کرامر-رائو خطای ره گیری تا ۱۰ برابر افزایش داشته است. بنابراین این فیلتر برای مساله BOT مناسب نیست (جدول ۱-۳ برد 2Km). باتوجه به این که بعضاً در مسائل کاربردی نویز حساسه قابل

های ۲۰۰ تا ۶۰۰ نسبت به EKF داشته اند. هم گرایی سریع اولیه به شرایط اولیه در فیلترهای IMM بهتر از EKF در دقایق اولیه بوده است. تخمین سایر پارامترهای ره گیری شامل کورس حرکتی ۲۲۰ درجه هدف و سرعت ۵ گره دریایی در فیلتر پیشنهادی سریع تر است.

ب- سناریوی دوم: حرکت نزدیک شونده (زاویه سمت حرکت ۲۰ درجه) فاصله تا هدف ۷ کیلومتر.

خطای فیلترها در ثانیه های اولیه ره گیری ناشی از فاصله زیاد هدف (کاهش نرخ رویت پذیری هدف) در سایر فیلترها در شکل (F2-2) مشاهده می شود. لیکن روش پیشنهادی پس از تشخیص توانسته است دامنه واگرایی و رشد خطای تخمین فاصله را نسبت به سایر فیلترها کاهش دهد. در ادامه با رشد رویت پذیری هدف، خطا به مقدار قابل ملاحظه ای کاهش یافته است.

ج- سناریوی سوم: تقرب با نرخ پایین در مسیر نسبتاً موازی نزدیک شونده (زاویه سمت ۱۲۰ درجه) فاصله اولیه تا هدف ۹ کیلومتر. در این مانور مشاهده پذیری ابتدا افزایش می یابد (مطابق باند خطا در منحنی تابع CRLB شکل (F1-5) تا محدوده ۲۰۰ متر). لذا منحنی خطای تخمین فاصله همه فیلترها در شکل (F2-3) کاهش یافته است. کاهش مشاهده پذیری در ثانیه ۲۵۰ تا ۴۰۰ و افزایش نامحسوس تا انتهای مسیر (تا محدوده باند خطای ۲۰۰ متر) موجب واگرایی همه فیلترهای IMM شده است تا جایی که تا انتهای مسیر با بایاس خطای ۲۰۰۰ متر همراه شده است. فیلتر EKF تا ثانیه ۴۰۰ توانسته است به خطای مناسب هم گرا گردد، اما در ادامه مسیر منحنی خطای برد تا ۲۰۰۰ متر واگرایی داشته است. فیلتر پیشنهادی در این سناریو با تشخیص نرخ کاهش رویت پذیری تا ثانیه ۱۰۰۰ واگرایی خطای را در بایاس ۱۰۰۰ متر کنترل نموده است و در ادامه نیز تا محدوده باند خطای ۲۰۰ متر (منطبق بر باند خطای CRLB در منحنی شکل (F1-5)) کاهش داده است و نسبت به سایر فیلترهای بهینه رایج مساله BOT عمل کرد بهتری داشته است. برای اطمینان از عمل کرد فیلتر پیشنهادی در بخش بعد، بررسی جامع تری با روش شبیه سازی در سناریوهای مختلف مساله ردیابی BOT اهداف دریایی انجام می گیرد.

۳-۴ بررسی کارآمدی مساله کاربردی دریایی در ره گیری

اهداف با سرعت ثابت به روش مونت کارلو

عموماً مقایسه ردگیری های مختلف بر مبنای شبیه سازی های مونت کارلو انجام می شود. در مراجع مختلف برای ارزیابی عمل کردی مساله BOT از توابع مختلفی استفاده شده است. از جمله توابع معیار کارآمدی ردگیری می توان به (۱) باند کرامر-رائو به عنوان شاخص بیشینه عمل کرد ممکن تخمین گر و یا مقایسه کارآمدی مسیر بهینه BOT به شکل رابطه (۳۰)، (۲) معیار ریشه میانگین مربعات خطا به عنوان متوسط خطای مونت کارلو در هر مرحله از تخمین به شکل رابطه (۳۱)، (۳) معیار کارآمدی η فیلتر جهت نمایش نرخ هم گرایی تخمین به شکل رابطه

[2] B. Omkar Lakshmi Jagan, S. K. Rao, A. Jawahar, and S. B. Karishma, "Passive target tracking using intercept sonar measurements," *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 9, no. 12, pp. 10-13, 2016.

[۳] عقیل عبیری، محمدرضا محزون، «ردیابی اهداف متحرک هوایی با استفاده از تخمین چگالی کرنل بر اساس الگوریتم فیلتر ذره»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴، شماره ۳، پاییز ۹۴.

[4] B. Ristic, S. Arulampalam, and N. Gordon, *Beyond the Kalman filter: Particle filters for tracking applications*, Artech house, 2004.

[5] B. S. Yaakov, X. R. Li, and T. Kirubarajan. *Estimation with applications to tracking and navigation: theory algorithms and software*. John Wiley & Sons, 2004.

[6] J.P. Le Cadre, "Discrete-Time Observability and Estimability Analysis for Bearings-Only Target Motion Analysis," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 33, no. 1, pp. 178-201, 1997.

[۷] محمد مهدی عارفی، «طراحی یک رؤیت‌گر مقاوم تطبیقی برای دسته وسیعی از سیستم‌های غیرخطی در حضور دینامیک‌های مدل نشده»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۷۴، شماره ۲، تابستان ۹۶.

[8] S. E. Hammel, P. T. Liu, E. J. Hilliard, and K. F. Gong, "Optimal observer motion for localization with bearing measurements," *Computers and Mathematics with Applications*, vol. 18, no. 1-3, pp. 171-180, 1989.

[9] Y. Oshman and P. Davidson, "Optimization of observer trajectories for bearings-only target localization," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 35, no. 3, pp. 892-902, 1999.

[10] A. N. Bishop, "Bearing-Only Localization using Geometrically Constrained Optimization," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 45, no. 1, pp. 308-320, 2009.

[۱۱] مهدی اردشیری، علیرضا الفی، «تعیین مسیر بهینه ناظر در ردیابی اهداف متحرک تنها با زاویه سمت با استفاده از چندجمله‌ای‌های چپ‌شف»، پذیرش شده در *مجله کنترل*، تیر ۹۷.

[12] Reif, Konrad, et al. "Stochastic stability of the discrete-time extended Kalman filter." *IEEE Transactions on Automatic control*, vol. 44, no. 4, pp. 714-728, 1999.

[13] X. Chen, R. Tharmarasa, and T. Kirubarajan. "Multitarget Multisensor Tracking". In *Academic Press Library in Signal Processing*, vol. 2, pp. 759-812. Elsevier, 2014.

[14] R. P. S. Mahler, *Advances in statistical multisource-multitarget information fusion*, Artech House, 2014.

[15] Lan, Jian, et al., "Second-order Markov chain based multiple-model algorithm for maneuvering target tracking," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 49, no. 1, pp. 3-19, 2013.

[۱۶] مهدی اردشیری، علیرضا الفی، «ارائه ابزار تشخیص هم‌گرایی روی خط در مسئله ره‌گیری تنها سمت هدف متحرک»، بیست و پنجمین کنفرانس برق ایران، دانشگاه خواجه نصیر تهران، ۱۳۹۶.

[۱۷] مقداد محمدی، حسین قلی‌زاده نرم، «طبیق کواریانس های نویز فیلتر کالمن توسعه‌یافته در ردیابی هدف از روی سمت به روش بازگشتی»، *مجله کنترل*، جلد ۱۰، تابستان، ۱۳۹۵.

[18] G. Quanbo et al. "Carrier tracking estimation analysis by using the extended strong tracking filtering," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 2, pp. 1415-1424, 2017.

[19] Liu, Kai-zhou, et al. "Navigation system of a class of underwater vehicle based on adaptive unscented Kalman filter algorithm." *Journal of Central South University*, vol. 21, no. 2, pp. 550-557, 2014.

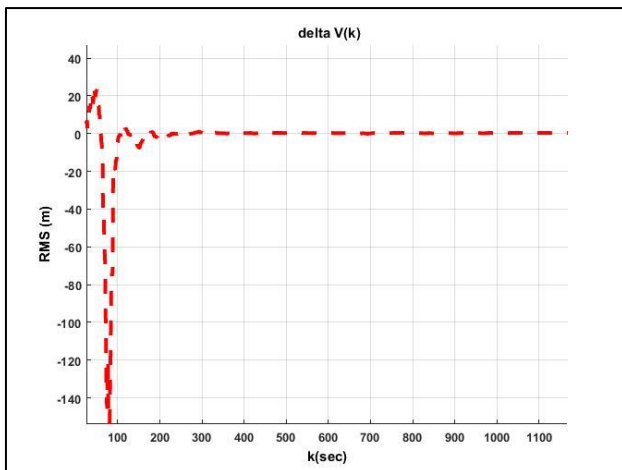
اندازه‌گیری است، عمل‌کرد فیلترهای معمول تطبیقی (جهت کواریانس نویز و حالت) بهبود چندانی نسبت به سایر فیلترها ندارند. همان‌طور که قبلاً پیش‌بینی شده‌بود فیلتر پیشنهادی در شرایط رویت‌پذیری بالا و باند خطای پایین کرامر-رائو همانند سایر فیلترهای بهینه عمل می‌کند، لیکن با کاهش رویت‌پذیری مساله (در مانورهای پررنگ جدول ۱) ضمن بهبود کارآمدی، تخمین تا ۵۰ درصد خطا را کاهش داده‌است. نتایج حاصله نشان‌دهنده بهبود عمل‌کرد و اطمینان لازم جهت بهره‌گیری از آن در مساله BOT است.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

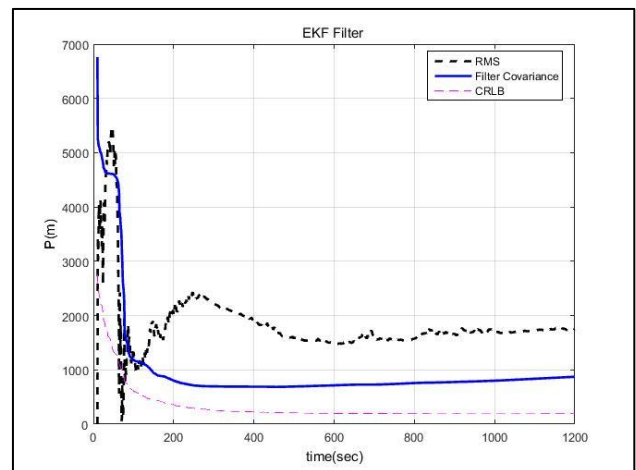
در این مقاله عمل‌کرد الگوریتم پیشنهادی برای حل مساله BOT به منظور ردگیری اهداف دریایی سطحی، با معیارهای ارزیابی فیلترهای ردگیری مطالعه شد. باتوجه به این‌که در این مساله، در شرایط کاهش مشاهده‌پذیری لزوماً انحراف کواریانس خطا، مبین واگرایی از جواب واقعی فیلتر نمی‌باشد، نشان داده شد نرخ تقرب کواریانس خطا به سمت باند کرامر-رائو به مانند یک تابع لیاپانوفی می‌تواند جهت تشخیص ناپایداری BOT مورد استفاده قرار بگیرد. مطابق ارزیابی انجام‌شده، این ایده برای تشخیص واگرایی از جواب واقعی مساله BOT، در ردگیری یک مساله کاربردی دریایی مفید است. همچنین باتوجه به این‌که کران داربودن کواریانس خطا از شروط لازم در پایداری فیلترهای خانواده کالمن می‌باشد، پس از تشخیص ناپایداری، بازنشانی کواریانس تخمین با باند پایین کرامر رائو می‌تواند از انحراف تخمین‌گر (متأثر از نویز نمونه‌برداری) جلوگیری نماید. در ادامه به منظور جلوگیری از زوال فیلتر پس از بهبود شرایط مشاهده‌پذیری، استفاده از روش ESTF مفید است و در شرایط نقصان مشاهده‌پذیری، استفاده از آن در مساله BOT پیشنهاد می‌گردد. تطبیق ضریب تنظیم متناسب با حساسیت فیلتر (نرخ رویت‌پذیری)، مقاوم‌سازی متناسب با نرخ سرعت و مانور هدف، و همچنین توسعه روش برای ردگیری سه‌بعدی اهداف به‌عنوان تحقیقات آتی پیشنهاد می‌گردد.

مراجع

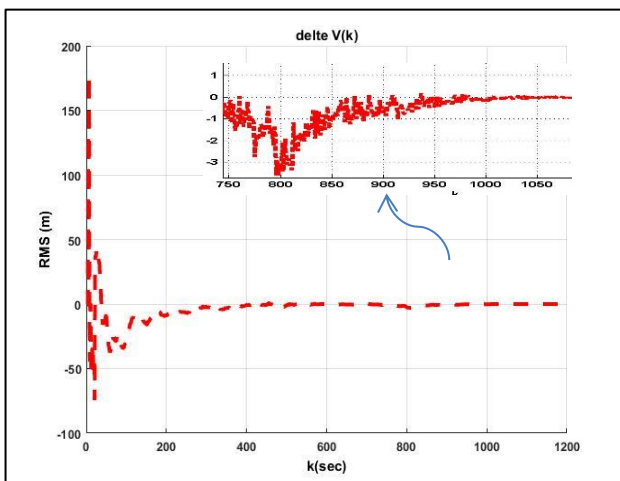
[1] P. I. Reji and V. S. Dharun, "Recursive Multistage Estimator for Bearings only Passive Target Tracking in ESM EW Systems," *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 8, no. 26, pp. 1-7, 2015.



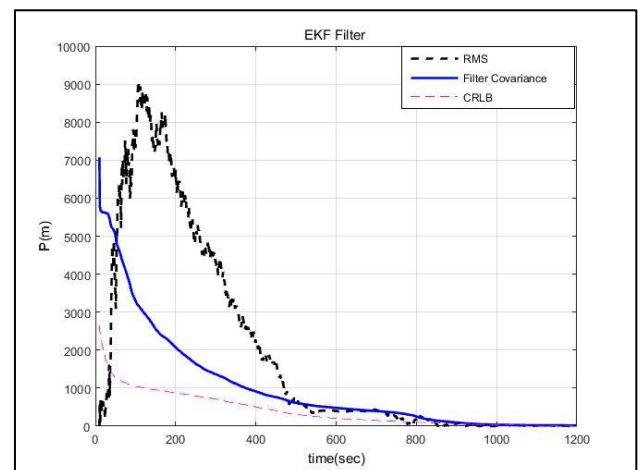
F1-2: معیار پایداری سناریوی اول



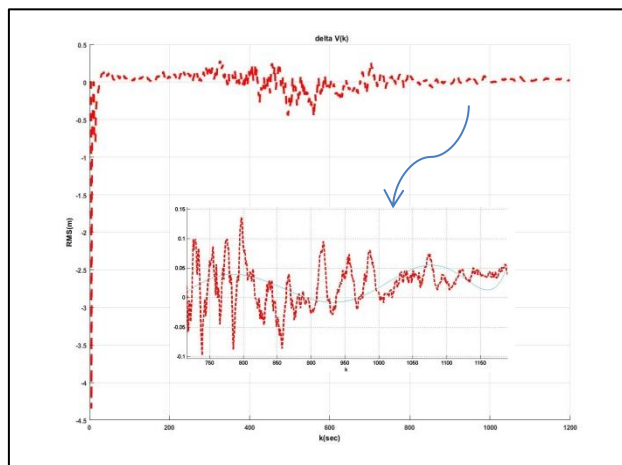
F1-1: خطا، کواریانس تخمین و معیار رویت پذیری سناریوی اول



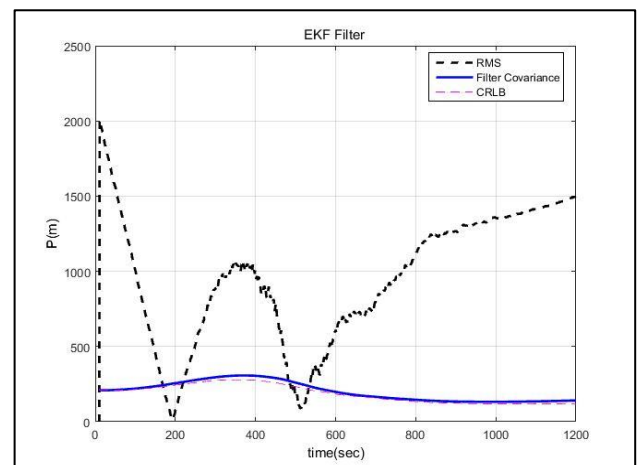
F1-4: معیار پایداری سناریوی دوم



F1-3: خطا، کواریانس تخمین و معیار رویت پذیری سناریوی دوم



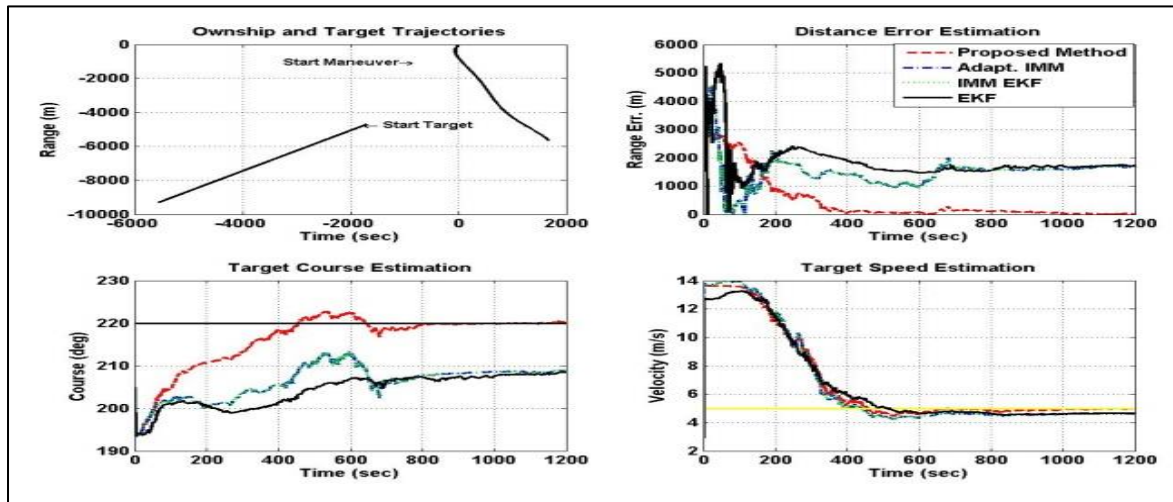
F1-6: معیار پایداری سناریوی سوم



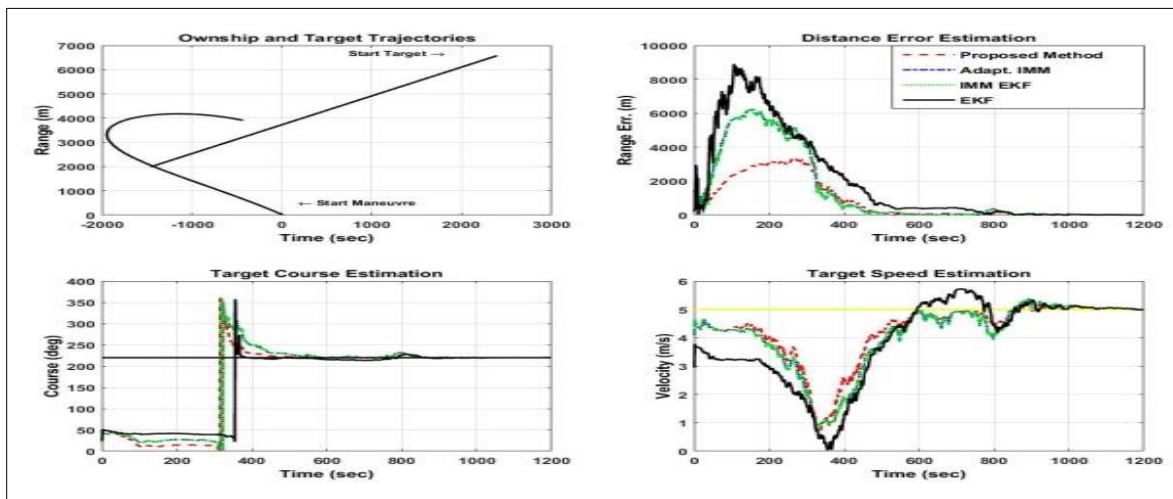
F1-5: خطا، کواریانس تخمین و معیار رویت پذیری سناریوی سوم

شکل F1: عمل کرد تابع پیشنهادی در تشخیص وضعیت پایداری خطای فیلتر EKF

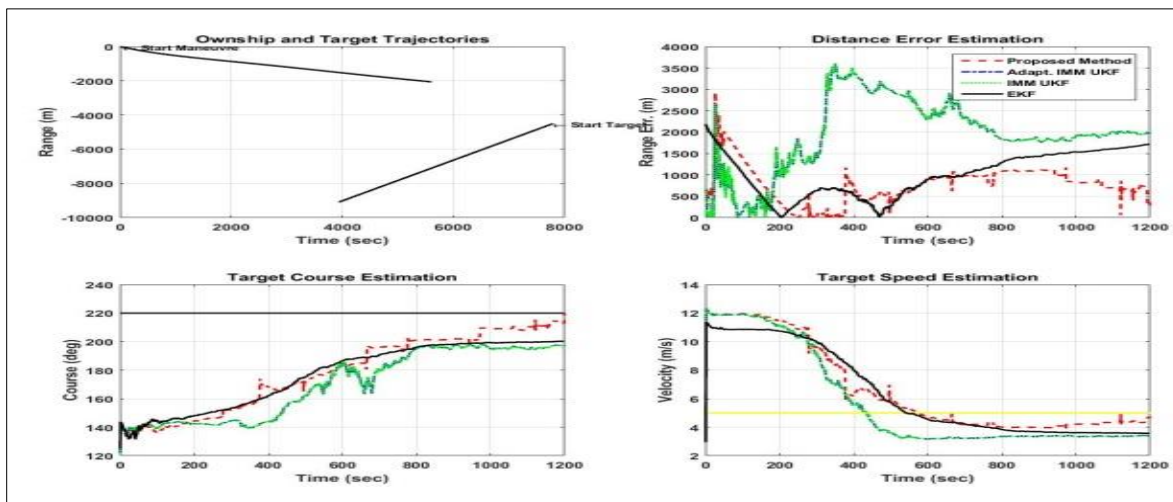
(F1-1 و F1-2 مانور دورشونده، F1-3 و F1-4 مانور نزدیک‌شونده، F1-5 و F1-6 مانور تقریباً موازی)



F2-1: سناریوی اول



F2-2: سناریوی دوم



F2-3: سناریوی سوم

شکل F2: مقایسه عمل کرد فیلتر پیشنهادی با فیلترهای Adaptive IMM_UKF، IMM_UKF و EKF در مساله BOT

شامل سناریوی حرکت هدف و ناظر، مقایسه خطای تخمین فاصله تا هدف، مقایسه تخمین کورس هدف و مقایسه تخمین سرعت هدف
جدول ۱: مقایسه عمل کرد روش پیشنهادی با سایر فیلترهای رایج BOT با معیارهای بررسی عمل کرد تخمین گر در ۳ سناریوی تعقیب (واحد محاسبات RMS, RTAM, CRLB متر و برای η درصد می باشد)

جدول ۱-۱ مانور ۱: Target Distance=2-10Km, Target Bearing =200deg.

Distance\ Bearing	2Km/20°				4Km/20°				8Km/20°				10Km/20°			
Estimator \ Criterion	η	CRLB	RTAM	RMS	η	CRLB	RTAM	RMS	η	CRLB	RTAM	RMS	η	CRLB	RTAM	RMS
Proposed	100	10.6	3.5	5.8	100	53	18	205	100	518	236	1593	100	518	486	1306
PAIMM_UKF	100	10.3	26.1	16.6	100	51	12	201	55	849	865	2353	70	610	865	2714
AIMM_UKF	100	10.1	5.7	7.1	100	49	17	202	100	560	488	1667	100	560	488	2291
IMM_UKF	100	9.6	5.8	7.1	100	51	18	202	100	409	445	1554	100	558	880	2120
EKF	60	9.9	16.3	12	100	50	20	204	86	983	683	2342	86	1025	879	2741

جدول ۱-۲ مانور ۲: Target Distance=2-10Km, Target Bearing=20deg

Distance\ Bearing	2Km/120°				4Km/120°				8Km/120°				10Km/120°			
Estimator \ Criterion	η	CRLB	RTAM	RMS	η	CRLB	RTAM	RMS	η	CRLB	RTAM	RMS	η	CRLB	RTAM	RMS
Proposed	100	86	70	225	100	182	99	301	100	197	51	761	41	231	561	376
PAIMM_UKF	100	92	127	230	20	188	917	702	27	194	702	1736	18	228	1213	2190
AIMM_UKF	100	75	70	244	19	177	947	875	13	174	1331	2144	9	198	2160	2912
IMM_UKF	100	76	70	250	18	178	993	907	12	175	1368	2234	9	200	2217	2923
EKF	26	179	667	818	8	153	1752	1987	24	164	680	1658	16	195	1219	2077

جدول ۱-۳ مانور ۳: Target Distance=2-10Km, Target Bearing =120deg

Distance\ Bearing	2Km/200°				4Km/200°				8Km/200°				10Km/200°			
Estimator \ Criterion	η	CRLB	RTAM	RMS	η	CRLB	RTAM	RMS	η	CRLB	RTAM	RMS	η	CRLB	RTAM	RMS
Proposed	70	465	662	582	100	660	432	386	75	824	1099	1020	42	885	2092	1841
PAIMM_UKF	100	574	396	413	100	701	564	551	48	902	1852	1829	36	970	2664	2539
AIMM_UKF	47	414	876	818	66	631	958	981	31	829	2606	2408	22	869	3849	3414
IMM_UKF	47	414	886	816	65	632	962	983	31	830	2626	2419	22	871	3847	3424
EKF	28	402	593	1239	38	645	168	1682	28	1170	4161	4001	26	1403	5242	4877

زیر نویس ها

¹² Interactive Multiple Model-Unscented Kalman Filter

¹³ Extended Kalman Filter (EKF)

¹⁴ Particle Filter

¹⁵ Steepest Descent

¹⁶ Bayesian

¹⁷ Fading factor

¹⁸ Extended Strong Tracking Filter

¹⁹ Interaction

²⁰ Root-mean square

²¹ Efficiency

²² Root time averaged mean square

¹ Bearings Only Tracking

² Target Motion Analysis

³ Electronic counter measure

⁴ Bearing

⁵ Multiple model

⁶ Mutually

⁷ Fisher Information Matrix (FIM)

⁸ Cramer-Rao Lower Bound(CRLB)

⁹ Efficiency

¹⁰ Consistency

¹¹ Residual