

تعیین مسیر بهینه ناظر در ردیابی اهداف متحرک تنها با زاویه سمت با استفاده از چندجمله‌ای‌های چبی شف

مهدی اردشیری^۱، علیرضا الفی^۲

^۱ دانشجوی دکتری برق-کنترل، دانشکده مهندسی برق و ریاضیات - دانشگاه صنعتی شاهرود، ardeshiri_mahdi@shahroodut.ac.ir

^۲ استاد تمام، دانشکده مهندسی برق و ریاضیات - دانشگاه صنعتی شاهرود، a_alfi@shahroodut.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۹

ویرایش: ۱۳۹۷/۰۲/۱۰

دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۱۶

چکیده: در این مقاله مساله بهینه‌سازی مسیر حرکت ناظر در ردیابی مکان اهداف متحرک سطحی با اندازه‌گیری زاویه سمت به تنهایی مطالعه می‌شود. عملکرد ردیابی هدف با زاویه سمت به تنهایی، به میزان رویت‌پذیری موقعیت اهداف در مسیر حرکتی ناظر/هدف یا مانور بهینه ناظر وابسته است. بدین منظور معیار بهینگی مستقل از تخمین‌گر هدف، بیشینه دترمینان باند پایین ماتریس اطلاعات فیشر انتخاب می‌شود. ابتدا مدل‌سازی مساله کنترل بهینه مسیر رویت‌گر به روش چندجمله‌ای متعامد چبی شف انجام می‌شود. سپس با بهینه‌سازی مستقیم عددی، قانون کنترل برای حرکت رویت‌گر مستقل از شرایط اولیه بدست می‌آید. مزایای مدل‌سازی پیشنهادی بیشینه کردن رویت‌پذیری کل زمان مانور، محاسبه قانون کنترل در زمان شروع مانور و انعطاف بالا در اعمال محدودیت‌های مسیر حرکت ناظر می‌باشد. کارایی روش ارائه شده توسط شبیه‌سازی با روش مونت کارلو با روش‌های مرسوم بهینه‌سازی مسیر به طور جامع مقایسه می‌گردد. همچنین عملکرد در سناریوهای مختلف برای ردیابی اهداف دور، نزدیک، متحرک و ساکن ارزیابی شده و قابل اعتماد بودن آن بررسی می‌شود. این روش در مساله کاربردی ردیابی یک شناور سطحی توسط زیردریایی با استفاده از سونار نیز استفاده می‌شود.

کلمات کلیدی: رهگیری سمت به تنهایی، رویت‌پذیری هدف، ماتریس اطلاعات فیشر، مسیر بهینه رویت‌گر، چندجمله‌ای چبی شف.

Optimal Observer Path Planning For Bearings-Only Moving Targets Tracking Using Chebyshev Polynomials

Mahdi Ardeshiri, Alireza Alfi

Abstract: In this paper, an optimization problem for the observer trajectory in the bearings-only surface moving target tracking (BOT) is studied. The BOT depends directly on the observability of the target's position in the target/observer geometry or the optimal observer maneuver. Therefore, the maximum lower band of the Fisher information matrix is opted as an independent criterion of the target estimator. First, modeling of the optimal control problem of the observer path is presented based on the orthogonal Chebyshev polynomial. Then, a control law for the observer direction, which is independent of the initial conditions, is obtained using the direct numerical optimization. The advantages of the proposed model include maximization of the total maneuver time, calculation of the control law at the start time of the maneuver, and high flexibility in applying the tracking constraints of the observer's motion. The efficiency of the proposed algorithm is compared with the conventional path optimization methods using the Monte Carlo. In addition, the performance of the algorithm is evaluated in different scenarios for target tracking, including remote, near, moving, and stationary, and its reliability is investigated. It is also applied in the surface submarine tracking problem using sonar.

Keywords: Bearings only tracking, Target observability, Fisher information matrix, Optimal observer path planning, Chebyshev polynomial.

۱- مقدمه

رهگیری اهداف در شرایطی که محدودیت اندازه‌گیری پارامترهای هدف با حساسه‌های فعال وجود دارد، تنها با اندازه‌گیری زاویه سمت اهداف توسط حسگرهای غیرفعال انجام می‌پذیرد که اصطلاحاً رهگیری سمت به تنهایی (BOT¹) نامیده می‌شود و کاربردهای زیادی خاصه در صنایع نظامی و تجاری دارد. مساله BOT با توجه به تعداد و موقعیت حساسه‌ها، تعداد اهداف و ابعاد حرکتی اهداف دسته‌بندی شده است. در بسیاری از مسائل کاربردی، موقعیت و شرایط اولیه هدف نیز در مساله BOT نامعلوم است. همچنین تعقیب با کمترین مانور با توجه به محدودیت‌ها و موانع مسیر حرکت ناظر، از الزامات اساسی این مساله کاربردی خاصه در عمل می‌باشد. مانور بالا موجب تولید نویزهای صوتی و آشکارپذیری بیشتر ناظر می‌گردد. در دهه‌های اخیر مساله BOT و تحلیل حرکت هدف (TMA²) موضوع مورد علاقه محققین بوده است. این موضوع برای مسائل اکوستیکی (زیردریایی که سونار غیرفعال دارد) و تجهیزات الکترو مغناطیسی (مراقب‌ها یا حسگرهای ESM) و تجهیزات اپتیکی (در ماهواره‌ها و دوربین‌های مادون قرمز) مورد استفاده بوده است [۱-۳]. تحقیقات زیادی در خصوص انواع مساله BOT انجام شده است که می‌توان به کتاب‌های مهم این موضوع در مراجع [۴-۶] اشاره نمود. نسخه استاندارد تحلیل حرکت سمت به تنهایی (BOTMA) شامل دو متحرک در یک سطح دو بعدی است که ناظر (تعقیب‌کننده) و هدف با سرعت شبه خطی با سرعت و جهت ثابت در طول زمان رهگیری، حرکت می‌کند. بدین ترتیب منظور از BOTMA کلاسیک، محاسبه چهار پارامتر شامل دو مختصات موقعیت جغرافیایی، سرعت و کورس (جهت حرکت) هدف است که با جمع‌آوری و اندازه‌گیری سمت هدف توسط حساسه سمت‌یاب یک ناظر انجام می‌پذیرد. تحت این فرض کلاسیک، اگر بردار سرعت ثابت باشد، ناظر نمی‌تواند هدف را شناسایی کند و لذا مسئله رویت‌پذیری نیست [۷-۹]. در دهه ۸۰ میلادی تاثیر مانور ناظر بر افزایش رویت‌پذیری هدف در مساله BOT مورد بحث قرار گرفته است [۷]. زمانی که رویت‌پذیری قطعی است با توجه به آمیختگی اندازه‌گیری سمت با خطا، دقت BOT به شدت به مانور رویت‌گر وابسته است. در مرجع [۸] نشان داده شده است که بیشینه نمودن رویت‌پذیری مساله BOT، از تعامل دو شرط متقابل که یکی کاهش فاصله ناظر تا هدف و دیگری حرکت متعامد ناظر بر خط دید هدف است، محقق می‌گردد. در برخی موارد، محققین از مسیرهای تقریبی حرکتی با مانور S شکل جهت تحقق الزام رویت‌پذیری استفاده نموده اند، لیکن این موضوع علاوه بر تولید نویز صوتی، موجب آشکارپذیری ناظر (شناور خودی) و هزینه طی مسیر اضافی است.

عمده مسائل اصلی کنترل مانور بهینه رویت‌گر برای موقعیت‌یابی^۳ هدف (هدف ساکن) انجام شده است [۱۰-۱۵]. در مرجع [۱۰]، حرکت حامل بر دو مسیر مستقیم‌الخط بررسی و تاثیر مسیر حرکت مقایسه گردیده است. با فرض کورس ثابت در گام اول مسیر، محاسبه کورس رویت‌گر در گام دوم مسیر به منظور بیشینه کردن دقت محاسبه فاصله هدف انجام شده است. در مرجع [۱۱]، برای یک مسئله موقعیت‌یابی، با تعریف تابع لیاپانوف محدودیت تقرب، مسئله بهینه‌سازی هامیلتونین-جاکوبی با افزودن باند پایین آشکارپذیری FIM برای مسئله BOT ارائه شده است. در [۱۲]، با بهره‌گیری از روش‌های حساب تغییرات (روش‌های غیرمستقیم بهینه‌سازی)، حل بسته‌ای برای مانور بهینه (وابسته به پارامتر ورودی ضریب تقرب) در مسئله موقعیت‌یابی (هدف ساکن) مطالعه شده است. در مراجع اخیر الزام برقراری این دو شرط متقابل، مسیر حرکت ناظر در مسائل کاربردی را به صورت مارپیچی (S شکل) [۳] تعریف نموده‌اند. اهمیت این روش علاوه بر سادگی محاسبات برخط^۴، عدم وابستگی محاسبات به نامعلوم بودن شرایط اولیه است. در این مراجع، روش ریاضی برای محاسبه سایر خصوصیات بهینه مانور مارپیچی از جمله سرعت چرخش ارائه نشده و عموماً رهگیری با بیشینه مانور حامل توصیه شده است. هزینه این روش، مسیر طولانی و نامطلوب مانور ناظر، امکان عدم رویت‌پذیری در برخی جهت‌های حرکتی از جمله مسیر فرار هدف، و بهینه نبودن زمان پایانی مانور نسبت به کل مانور می‌باشد. کمینه بودن مسیر حرکتی ناظر در جهت تقرب به هدف، علاوه بر بهبود شرط رویت‌پذیری در سناریوهای دورشنده هدف، باعث تخمین دقیق در زمان انتهایی مانور می‌گردد. به عنوان یک مثال جامع از روش حل غیرمستقیم، در مرجع [۱۲]، با تشکیل یک مساله مقدار مرزی هامیلتونی (HBVP) و با استفاده از نظریه حساب تغییرات، رابطه‌ای بین جهت حرکت ناظر و زاویه سمت هدف در مسیر بهینه ارائه شده است. دشواری حل، فرض شرایط مرزی نهایی و معلوم بودن موقعیت اولیه هدف از محدودیت‌های این روش است. از طرف دیگر، روش‌هایی که زمان نهایی مانور را بررسی کرده‌اند، در ابتدای مسیر، تقرب ناظر به هدف و در انتهای مسیر، دور زدن هدف را توصیه می‌کنند [۱۳]. همچنین در مرجع [۱۵]، مسیریابی ناظر در جهت کاهش کواریانس خطای تخمین انجام شده و نتایج با مرجع [۱۲] مقایسه شده است.

در این مقاله، بهینه‌سازی مسیر یک ناظر (یک حساسه اندازه‌گیر سمت هدف) در رهگیری حرکت دو بعدی یک هدف متحرک مورد نظر است. چنانکه در بالا ذکر شد، اگر بردار سرعت ناظر ثابت باشد، مساله رویت‌پذیر نبوده و شناسایی ممکن نیست. از طرفی دیگر، به دلیل غیرخطی و نامعلوم بودن مدل و پارامترهای اولیه سیستم، تعیین معیاری که به‌وسیله آن به صورت برخط بتوان رویت‌پذیری سیستم را سنجید و یا بهبود داد اغلب غیرممکن است. در مساله بهبود مسیر ناظر، محدودیت در

³ Localization⁴ Online¹ Bearings-Only Tracking² Target Motion Analysis

با توجه به توضیحات داده شده، این مقاله به طراحی مسیر یک ناظر به روش کنترل بهینه برای حرکت در صفحه (برای اهداف سطحی شناوری) می‌پردازد. فرض شده است که ناظر قابلیت اندازه‌گیری فقط زاویه سمت یک هدف را دارد و با داشتن موقعیت ناظر در هر لحظه، موقعیت هدف تخمین زده می‌شود. طراحی مسیر ناظر با هدف رویت‌پذیری هرچه بیشتر موقعیت هدف صورت پذیرفته است. مدل‌سازی و حل مساله کنترل رویت‌پذیر بهینه با استفاده از روش‌های عددی انجام می‌شود و با بهره‌گیری از ویژگی‌های بهینه‌سازی مسیرمانور تا زمان نهایی آن، تابع کنترل مسیر مستقل از شرایط و فاصله اولیه هدف محاسبه می‌گردد. پس از مدل‌سازی مساله کنترل بهینه مسیر ناظر، برای حل مسئله از چندجمله‌ای متعامد چپ شیف استفاده می‌شود و قانون کنترل برای حرکت ناظر بدست می‌آید. سپس کارایی روش ارائه شده توسط شبیه‌سازی مونت کارلو با روش‌های دیگر بهینه‌سازی مسیر مقایسه می‌شود. معیار بهینگی تخمین هدف، افزونگی درمیان باند پایین FIM انتخاب شده است. در این تحقیق همگرایی سریع، محاسبات آسان و انعطاف در طرح‌ریزی سناریو از ویژگی‌های این روش است. بازه رهگیری از زمان $[0, \infty)$ به بازه متناهی $(-1, 1)$ تبدیل می‌گردد و کلیه قیود دیفرانسیلی و انتگرالی با تقریب مناسبی به توابع چندجمله‌ای متعامد نگاشت می‌شوند. سپس با روش‌های بهینه‌سازی معمول، قانون کنترل شامل رابطه مسیر حرکت ناظر با زاویه سمت هدف تعیین می‌گردد. با توجه به محدودیت‌های مساله BOT از جمله پارامترهای نامعلوم اولیه و انتهای خاصه فاصله تا هدف و شرایط مرزی انتهای مانور ناظر، در روش پیشنهادی این مقاله موارد ذیل لحاظ شده است:

- ۱- طراحی روتینگر بهینه مساله BOT با تعریف تابع هامیلتونین، به منظور بهره‌گیری از دقت بالای بهینه‌سازی روش‌های کلاسیک (دقت بالای روش‌های بهینه‌سازی غیرمستقیم)
- ۲- نگاشت مساله روتینگر بهینه کلاسیک به یک مساله حل عددی NLPP با استفاده از چندجمله‌ای‌های متعامد چپ شیف به منظور گسسته‌سازی در طول زمان مانور و بهینه‌سازی مساله در بردارهای متعامد، که این امر به دلیل دشواری و محدودیت‌های روش‌های حل تحلیلی روتینگر بهینه در مساله BOT انجام شده است.
- ۳- عدم نیاز به معلوم بودن شرایط اولیه و مرزی که از الزامات و محدودیت‌های حل تحلیلی به روش‌های کلاسیک است.
- ۴- ارائه تابع کنترلی منحصر به فرد مسیر بهینه روتینگر (برای فواصل مختلف) برای اهداف ساکن، سرعت ثابت و یا مانوردار، که در ابتدای مانور ناظر متناسب با محدودیت‌های حرکت آن محاسبه می‌شود و در اهداف متحرک متناسب با زاویه نسبی دید و مانور آنها، مسیر بهینه به صورت برخط تطبیق داده می‌شود.
- ۵- استفاده از تابع هزینه باند پایین FIM جهت طراحی روتینگر به عنوان یک معیار رویت‌پذیری مستقل از پارامترهای تخمین.

مسیر حرکت و میدان دید ناظر تأثیرگذار است. کنترل بهینه ناظر در مسیری که باعث کاهش بیشتر کوواریانس خطای تخمین باشد می‌تواند موجب افزایش رویت‌پذیری شود. البته این معیار وابسته به نوع تخمینگر می‌باشد. عموماً در کارهای ارائه شده در مراجع، تابعی اسکالر از ماتریس اطلاعات فیشر^۱ (FIM) بیشینه می‌گردد [۸] و در برخی مراجع کمینه باند پایین کرامر راثو^۲ (CRLB)، از معکوس ماتریس فیشر محاسبه [۱۶] به عنوان معیار بهینگی استفاده می‌شود. در مرجع [۱۲]، یکسان بودن عملکرد این دو معیار بر تعیین مسیر بهینه ناظر نشان داده شده است.

حل مسائل کنترل بهینه را می‌توان به روش‌های مستقیم^۳ و غیرمستقیم^۴ دسته‌بندی کرد [۱۷]. در روش‌های غیرمستقیم، اساس کار بر یافتن جواب مبتنی بر شرایط لازم بهینگی است که از روش‌های حساب تغییرات و اصل پونتیاگین بدست می‌آید. حساسیت روش‌های بهینه‌سازی حساب تغییرات، مبتنی بر تحقق شرط لازم (مشتق مرتبه اول) و شرایط مرزی مساله است. در مقابل روش‌های مستقیم، بهینه‌سازی مبتنی بر گسسته‌سازی مساله کنترل بهینه و تبدیل آن به یک مساله حل عددی NLPP^۵ است که برای حل آن از روش‌های بهینه‌سازی عددی استفاده می‌شود. مزیت اصلی روش‌های مستقیم، عدم نیاز به یافتن شرایط لازم مرتبه اول روش‌های غیرمستقیم^۶ HBVP است. از جمله روش‌های مستقیم بهینه‌سازی جواب، استفاده از تقریب چندجمله‌ای‌های متعامد توابع لژاندر^۷، چپ شیف^۸، هرمت^۹، لاگنر^{۱۰} و دسته توابع سری فوریه می‌باشند. از جمله ویژگی‌هایی که تکنیک‌های مبتنی بر چندجمله‌ای‌های لژاندر و چپ شیف را برای حل مسئله کنترل بهینه، از بقیه روش‌های عددی متمایز می‌کند می‌توان به ساده بودن فرآیند گسسته‌سازی و دقت بالا اشاره کرد. در این روش‌ها پارامترهای متغیرهای حالت و کنترل، به طور همزمان گسسته‌سازی می‌شوند. بنابراین معادلات دیفرانسیل به یک سری قیود جبری تبدیل و به NLPP اضافه می‌گردند [۱۸]. موضوع مهم و تأثیرگذار بر تعیین مسیر بهینه، کران زمانی است که معیار رویت‌پذیری در آن بهینه می‌گردد. از این منظر، پژوهش‌های انجام شده شامل بهینگی در یک گام جلوتر یا در زمان نهایی دسته‌بندی شده‌اند. عموماً بهره‌گیری از روش‌های بیشینه نمودن تابع معیار در یک گام جلوتر، حرکت ناظر به صورت مارپیچ حول هدف می‌باشد. البته روش‌های کلاسیک نظریه کنترل بهینه می‌توانند به قوانین کنترلی موثرتری منتهی گردند، لیکن با توجه به غیرخطی و نامعلوم بودن پارامترهای مساله BOT، حل این توابع دشوار و در برخی موارد با خطای زیاد توأم می‌گردد.

¹ Fisher Information Matrix (FIM)

² Cramer-Rao Lower Bound (CRLB)

³ Direct

⁴ Indirect

⁵ Nonlinear Programming Problem

⁶ Hamiltonian Boundary Value Problem

⁷ Legendre Polynomial

⁸ Chebyshev Polynomial

⁹ Hermit Polynomial

¹⁰ Laguerre

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

$$U_{k-1,k} = \begin{bmatrix} u_{k1} \\ u_{k2} \\ u_{k3} \\ u_{k4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_k^o - x_{k-1}^o - T\dot{x}_{k-1}^o \\ y_k^o - y_{k-1}^o - T\dot{y}_{k-1}^o \\ \dot{x}_k^o - \dot{x}_{k-1}^o \\ \dot{y}_k^o - \dot{y}_{k-1}^o \end{bmatrix} \quad (3)$$

ماتریس انتقال حالت مدل در لحظه k برابر F_k است و بردار $U_{k,k+1}$ به طور دقیق با حساسه‌های ناوبری ناظر مانند GPS اندازه‌گیری می‌شود.

همچنین معادلات غیرخطی بردار اندازه‌گیری زمان گسسته z_k با نویز اندازه‌گیری گوسی با میانگین صفر $v_k \sim N(0, R_k^j)$

مقادیر اولیه نامعلوم و غیرخطی مساله BOT در نمونه برداری اولیه z_0 :

$$x_0 = r_0 \cdot \sin(z_0) \quad r_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \quad (4)$$

همچنین، معادلات غیرخطی اندازه‌گیری سمت هدف به صورت ذیل است:

$$z_k = h(X_k) + v_k = \beta_k + v_k \quad (5)$$

$$h(X_k) = \tan^{-1}\left(\frac{x}{y}\right) \quad (6)$$

$$x = r \cdot \sin(z) \quad (7)$$

$$y = r \cdot \cos(z)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

۲-۱ تخمین هدف در مساله BOT

مساله TMA در مختصات کارترین برای معادلات اندازه‌گیری رابطه (۶) غیرخطی است. بنابراین الگوریتم فیلترهای خطی کارآمد نیست. در این تحقیق در مواقع لزوم از فیلتر توسعه‌یافته کالمن^۱ جهت تخمین بردارهای حالت به شرح ذیل استفاده می‌شود.

- پیش‌بینی بردار حالت و ماتریس کواریانس خطا

$$\hat{X}_{k+1|k} = F_k \cdot \hat{X}_{k|k} - U_{k,k+1} \quad (8)$$

$$P_{k+1|k} = F_k \cdot P_{k|k} F_k' + Q_k \quad (9)$$

- بهره فیلتر کالمن توسعه‌یافته

$$G_{k+1} = P_{k+1|k} \hat{H}_{k+1}' [\hat{H}_{k+1} P_{k+1|k} + \hat{H}_{k+1}' + \delta_{\beta_{k+1}}^2]^{-1} \quad (10)$$

- محاسبه بردار خطی اندازه‌گیری با استفاده از محاسبات بردار تخمین

$$\hat{H}_k = \frac{dh(X_k)}{dx} |_{x=\hat{x}_{k+1|k}} \quad (11)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\hat{y}_{k+1|k}}{\hat{r}^2} & -\frac{\hat{x}_{k+1|k}}{\hat{r}^2} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

- بروزرسانی بردار تخمین و کواریانس خطا

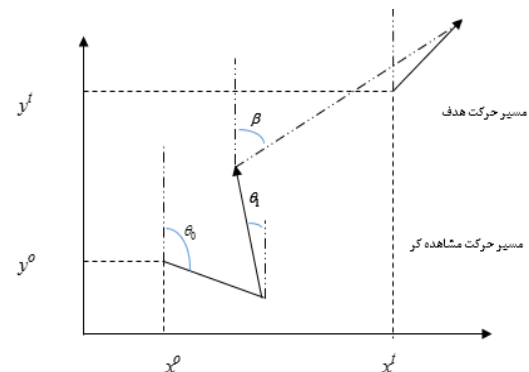
$$\hat{X}_{k+1|k+1} = \hat{X}_{k+1|k} + G_{k+1} [z_{k+1} - \hat{\beta}_{k+1|k}] \quad (12)$$

۶- قابلیت کاهش خطای روش پیشنهادی در ابتدا و انتهای مانور ناظر که باعث همگرایی سریع مساله BOT و کاهش خطای تخمین نسبت به سایر روش‌های یک گام به جلوی بهینه‌سازی می‌گردد.

جهت بررسی روش پیشنهادی، عملکرد آن با مهمترین روش‌های بهینه‌سازی غیرمستقیم [۱۲] و مراجع ارائه شده اخیر بهینه‌سازی به روش مستقیم [۱۵] مقایسه می‌شود. در ادامه مقاله در بخش ۲ پس از تعریف هندسه مساله، معیارهای رویت‌پذیری FIM و همگرایی CRLB ارائه می‌شود. پس از ارائه روش پیشنهادی در بخش ۳، عملکرد آن در مقایسه با روش‌های غیرمستقیم و مستقیم در بخش ۴ نشان داده می‌شود. در بخش انتهایی، نتیجه‌گیری و فعالیت‌های آتی پیشنهادات می‌شود. معرفی پارامترهایی که در متن تعریف نشده اند در پیوست الف آمده است.

۲- تعاریف و مدل‌سازی مساله BOT

شکل ۱ هندسه دو بعدی مساله BOT را نشان می‌دهد. متغیرهای استفاده شده در مقاله مطابق شکل ۱ عبارتند از:



شکل ۱: هندسه دو بعدی مساله BOT [۱۳]

مساله عمومی BOT تخمین مسیر حرکت هدف (سرعت و موقعیت 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 در حالت هدف با سرعت و جهت ثابت (بدون مانور)، از دستگاه مختصات کارترین استفاده می‌شود. بنابراین مدل‌سازی هدف و معادلات حالت مساله رهگیری BOT همراه تابع اندازه‌گیری غیرخطی مساله BOT با گسسته‌سازی در لحظه k ام به صورت روابط ذیل تعریف می‌شود [۵].

$$X_k^t = [x_k^t \ y_k^t \ \dot{x}_k^t \ \dot{y}_k^t]^T \quad V_t: \text{بردار حالت هدف با سرعت خطی}$$

$$X_k^o = [x_k^o \ y_k^o \ \dot{x}_k^o \ \dot{y}_k^o]^T \quad V_o: \text{بردار حالت ناظر با سرعت خطی}$$

بردار 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 مقدار اندازه‌گیری آن به ترتیب:

معادلات دینامیکی گسسته فضای حالت هدف، با سرعت ثابت، با فرض نامعلوم بودن شتاب و اعمال آن در مدل به صورت نویز مستقل گوسی به صورت $W_k = [w_{x_k}, w_{y_k}]^T = [\ddot{x}_k, \ddot{y}_k]^T$ به شرح ذیل می‌باشد:

$$X_{k+1} = F_k X_k + G_k W_k - U_{k,k+1} \quad (1)$$

¹ Extended Kalman Filter (EKF)

$$A_{1\sigma} = \pi \sqrt{\det P} \quad (19)$$

بنابراین، مانور بهینه ناظر، افزایش رویت‌پذیری مسیر حرکت ناظر بر مبنای کاهش ناحیه خطا مطابق با رابطه (۱۸) است. برای یک تخمینگر کارآمد ناحیه عدم قطعیت دو بعدی خطا مطابق رابطه ذیل است که کاهش آن با افزایش FIM میسر می‌گردد.

$$A_{1\sigma} = \frac{\pi}{\sqrt{FIM}} \quad (20)$$

۲-۳ انتخاب تابع هزینه بهینه‌سازی مسیر ناظر

اساس بحث بهینه‌سازی مسیر BOT بر مبنای بیشینه FIM با مانور ناظر محقق می‌شود. قاعده مانور ناظر بر اساس هندسه حرکتی مورد علاقه و مطلوب ناظر و هدف تعیین می‌گردد که بایستی موجب افزایش رویت‌پذیری هدف و کاهش ناحیه عدم قطعیت به منظور بالابردن دقت تخمین گردد. توابع هزینه متعددی برای بهینه‌سازی مسیر معرفی شده‌اند که عمدتاً به افزایش رویت‌پذیری مسیر ناظر مرتبط می‌گردد. از موارد مهم می‌توان به ماتریس اطلاعات متقابل^۲، کاهش CRLB، کاهش کواریانس خطای تخمین، افزایش دترمینان FIM و یا افزایش باند پایین دترمینان FIM اشاره نمود. هرچند استفاده از کمینه خطای کواریانس تخمین در برخی از مقالات به‌عنوان یک معیار، به‌طور مستقیم کاهش خطای تخمین را هدف قرار داده است [۷]؛ لیکن این معیار وابسته به تخمینگر بوده و تنها بهینه‌سازی در یک گام جلوتر را هدف قرار می‌دهد. در این تحقیق بیشینه باند پایین دترمینان FIM، به شرح ذیل استفاده می‌شود. لازم به ذکر است این معیار علاوه بر کاهش باند خطای CRLB، نیازی به محاسبات دشوار ماتریس معکوس FIM ندارد و مشابه معیار CRLB عمل می‌کند [۱۲]. همچنین، در کل زمان مانور مسیر بهینه محاسبه می‌شود.

$$W = \left(-\sigma_{\beta}^2 \int_0^{t_f} \left(\frac{\dot{\beta}}{r^2} \right) d\tau \right) \quad (21)$$

هرچند مشخصات یک تخمینگر در بهینه‌سازی‌های الگوریتم تخمین موثر است، لیکن در این مقاله مورد بحث نبوده و تنها در شبیه‌سازی‌ها به عنوان مقایسه، مطابق سایر مقالات، بهره‌گیری شده است.

۳ بهینه‌سازی مستقیم مساله BOT به روش جیبی شیف با طرح‌یزی سناریوی دلخواه

با توجه به مدل‌سازی مساله BOT در بخش قبل و تعریف تابع هزینه رویت‌پذیری هدف، معادلات دینامیکی هدف و محدودیت‌های مسیر حرکت ناظر با تعریف ورودی کنترل، مسیر بهینه زمان پیوسته به یک مساله کنترل بهینه مسیر به شکل روابط (۲۲) تعریف می‌گردد.

$$P_{k+1|k+1} = [I_{4 \times 4} - G_{k+1} \hat{H}_{k+1} P_{k+1|k}] \quad (13)$$

برای عملکرد مناسب EKF در مساله BOT، تنظیم مقادیر اولیه و تطبیق کواریانس تخمین اهمیت دارد. همچنین بهره‌گیری از اطلاعات قبلی^۱ فاصله و سرعت هدف مفید است. لذا می‌توان از فیلترهای تطبیقی جهت به‌روزرسانی کواریانس تخمین بهره‌گیری نمود [۱۹]. در این تحقیق از الگوریتم‌های بهینه تطبیقی برای همگرایی سریع کواریانس خطا به دینامیک حرکت هدف استفاده می‌شود.

$$\hat{X}_{0|0} = [\bar{r} \cdot \sin z_0; \bar{r} \cdot \cos z_0; 0; 0] \quad (14)$$

$$P_{0|0} = \text{diag}[\sigma_r^2; \sigma_r^2; \sigma_s^2; \sigma_s^2] \quad (15)$$

۲-۲ معیار سنجش رویت‌پذیری مسیر حرکت ناظر

استفاده از معادلات شبه‌خطی سنجش رویت‌پذیری در توابع غیرخطی، برای بررسی یکنایی تخمین مرسوم است. لیکن، این روش گزارشی از کیفیت رویت‌پذیری ارائه نمی‌دهد. در عمده مراجع افزایش دترمینان FIM و یا کاهش معکوس آن، معادل دترمینان CRLM که در فیلتر بدون بایاس معادل کمینه کواریانس خطا است، معیارهای مرسوم رویت‌پذیری تخمینگرهای غیرخطی هستند. بنابراین، بیشینه FIM و یا کمینه CRLM، معیارهای بهینه مستقل از پارامترهای تخمینگر برای تشخیص رویت‌پذیری هدف می‌باشد. لذا در این مقاله از این معیار بهره‌گیری شده است. رابطه کلی FIM در یک تخمین بدون بایاس برای بردار Z_k شامل دنباله اندازه‌گیری $\{z_1, \dots, z_k\}$ ، از چگالی احتمال شرطی بردار اندازه‌گیری به بردار مسیر حالت $P_{Z_k|x_k}(Z^k|x_k)$ تعریف می‌شود [۱۵].

$$FIM = -E \left[\frac{\partial^2 \ln P \left(\frac{Z^k}{x_k} \right)}{\partial x_k^2} \right] = E \left[\frac{\partial \ln P \left(\frac{Z^k}{x_k} \right)}{\partial x_k} \right]^2 \quad (16)$$

ماتریس FIM به روش بازگشتی به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۵].

$$FIM = J_{k+1} = [F_k^{-1}]' J_k F_k^{-1} + \frac{1}{\sigma_{\beta}^2(k)} [H_{k+1}]' \cdot H_{k+1} \quad (17)$$

رابطه اساسی ذیل در تخمینگرهای بدون بایاس برای CRLM و کواریانس خطای تخمین برقرار است که در تخمین ایده‌آل به تساوی تبدیل می‌گردد [۶].

$$P_{k|k} \triangleq E \left\{ (\hat{x}_{k|k} - x_k)(\hat{x}_{k|k} - x_k)^T \right\} \geq J_k^{-1} \quad (18)$$

ماتریس کواریانس خطا یک ماتریس نیمه‌معین مثبت است. فرم درجه دو خطای موقعیت به شکل بیضیگون نمایش داده می‌شود که مقدار آن با مقادیر ویژه ماتریس کواریانس خطا P برابر است و چرخش محورهای خطا با بردارهای ویژه آن معین می‌شود. محدوده خطا برابر است با

² Mutual Information

¹ Priori Knowledge

$$\int_{-1}^1 f(x)dx = \sum_{s=0}^N b_{Ns}f_s, \quad s = 1, 2, \dots, N$$

$$b_{Ns} = \frac{4}{N} \sum_{j=0}^{N/2} \frac{1}{1-4j^2} \cos \frac{2j\pi s}{N}$$

$$b_{N0} = b_{NN} = \frac{.5}{N^2-1} \quad (27)$$

$$f' = (x_i) = \sum_{j=0}^N d_{ij}f(x), \quad i = 0, 1, \dots, N$$

$$d_{ij} = \frac{4\theta_j}{N} \sum_{n=0}^N \sum_{(n+1) \text{ odd}}^{n-1} \frac{\theta_n}{c_i} T_n(x_j) T_l(x_j),$$

$$i = 0, 1, \dots, N$$

$$\theta_0 = \theta_N = 1/2, \quad \theta_j = 1 \text{ for } j = 1, 2, \dots, N-1 \quad (28)$$

$$\text{if } i \geq 1 \quad c_i = 1 \quad \text{else } c_i = 1,$$

براین اساس، حل الگوریتم بهینه‌سازی BOT به شکل ذیل طرح‌ریزی می‌گردد.

گام اول:

- انتخاب ورودی کنترل

- انتخاب زمان مانور t_f

- انتخاب مرتبه چندجمله‌ای جیبی شف N

- تغییر متغیر $\tau = \frac{t_f}{2}(1+t)$ از $[0, t_f]$ به $[-1, 1]$

- انتخاب $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ به عنوان کران‌های تابع معیار و کران‌های مورد قبول گام دوم:

- تنظیم اولیه مسیر مورد نظر در پایه‌های چندجمله‌ای که به منظور دستیابی به مسیر یکنای بهینه تعادل دو شرط مخالف، بیشینه ریت‌پذیری شامل حرکت متعامد بر مسیر (در جهت افزایش β) و تقرب به هدف (در جهت کاهش فاصله تا هدف)، مد نظر قرار می‌گیرد. یکی از مزایای روش پیشنهادی امکان کنترل بهینه مسیر در کل زمان مانور است.

- انتخاب زاویه سمت نسبی هدف به عنوان ورودی مانور ناظر جهت استقلال مسیر بهینه به دینامیک مسیر حرکت

- تقریب مشتق توابع جیبی شف مطابق رابطه (28) برای معادلات دینامیکی حرکت (1) به شرح ذیل

$$\sum_{j=0}^N d_{ij}x(t_i) = V \sin(\theta(t_i))$$

$$\sum_{j=0}^N d_{ij}y(t_i) = V \cos(\theta(t_i)) \quad (29)$$

$$\theta_i = \theta(t_i) = \sum_{j=0}^N a_j T_j(t_i)$$

$$u_i = \theta(t_i) - \beta(t_i)$$

که در آن N مرتبه چندجمله‌ای جیبی شف، a_j و d_{ij} به ترتیب از روابط (24) و (28) محاسبه می‌شوند.

تابع هزینه مسیر بهینه با استفاده از روابط (1) و (22) به صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$\text{Min } W = \text{Min} \left(-\sigma_\beta^2 \int_0^{t_f} \left(\frac{\dot{\beta}}{r^2} \right) d\tau \right)$$

$$\dot{x} = \dot{r} \sin \theta$$

$$\dot{y} = \dot{r} \cos \theta \quad (22)$$

$$S_i(x, u, t) \leq 0, \quad i = 0, 1, \dots, N$$

همانطور که در مقدمه در خصوص پژوهش‌های انجام شده در یافتن مسیر بهینه مساله BOT عنوان شد، روش‌های عددی ارائه شده با فرض معلوم بودن شرایط اولیه (فاصله اولیه هدف) و برای مساله موقعیت‌یابی اهداف ساکن ارائه شده‌اند. هدف این مقاله، یافتن مسیر بهینه منحصر بفرد با فرض نامعلوم بودن شرایط اولیه است که نسبت به اهداف متحرک نیز کارآمد باشد. لذا ورودی کنترل مستقل از پارامترهای مجهول زاویه نسبی مشاهده هدف، کورس ناظر در نظر گرفته شده‌اند.

با توجه به وجود عامل انتگرالی در تابع هزینه طراحی مسیر ریت‌پذیر بهینه (22)، پیش‌بینی مسیرهای ممکن با پارامتر مجهول فاصله هدف (r) در کل زمان مانور جهت محاسبه کمینه رابطه (22) با ابزارهای حل مستقیم بسیار دشوار و زمان‌بر است. لذا برای حل این مساله، روش بهینه‌سازی چندجمله‌ای‌های متعامد برای مساله BOT پیشنهاد می‌شود. بدین منظور از توابع پایه‌ای قطعه‌ای پیوسته جیبی شف استفاده می‌گردد. بهینه‌سازی تابع معیار در چند نقطه در طول مسیر مطابق با ابعاد انتخابی پایه‌های متعامد انجام می‌شود. بنابراین بهینه‌سازی در طول زمان مانور به روش مستقیم در زمان شروع مانور امکان‌پذیر شده است. انتخاب پارامترهای ورودی کنترل‌پذیر در پایداری این نوع بهینه‌سازی اهمیت دارد. ویژگی دیگر استفاده از چندجمله‌ای‌های متعامد، گسسته‌سازی همزمان متغیرهای حالت و کنترل قیود موجود در مساله BOT به‌طور همزمان است. بنابراین معادلات دیفرانسیل و انتگرال‌گیر به یک دسته از قیود جبری تبدیل و به NLPP اضافه می‌شوند. ابتدا فرض می‌کنیم تابع $f(t)$ در فاصله $(-1, 1)$ تعریف شده است. مقدار تقریب تابع بر اساس چندجمله‌ای‌های متعامد جیبی شف $T_n(x)$ به صورت رابطه (23) می‌باشد [20].

$$f(x) = \sum_{r=0}^N a_r T_r(x) \quad (23)$$

$$a_r = \frac{2}{N} \sum_{j=0}^N f(x_j) T_r(x_j) \quad (24)$$

$$x_j = \cos\left(\frac{j\pi}{N}\right), \quad j = 0, 1, \dots, N. \quad (25)$$

مطابق تعریف توابع متعامد جیبی شف داریم:

$$T_{0=1/2}, T_1 = x$$

$$T_{n+1} = 2xT_n(x) - T_{n-1}(x) \quad (26)$$

$$T_n = T_{n/2}, \quad n = 1, 2, \dots$$

برای روابط انتگرالی در مساله بهینه‌سازی از تبدیلات ارائه شده در (27) و روابط مشتقی (28) استفاده می‌شود [21].

است که بدون وابستگی به نامعلوم بودن شرایط اولیه فاصله تا هدف در کوتاهترین زمان ممکن خطای رویت‌پذیری کمینه شود. عمدتاً در مقالات در روش‌های تحلیلی [۳] و عددی [۶ و ۷] از پارامتر بی‌بعدی به نام نسبت تقرب استفاده شده است که با توجه به حداکثر زمان لازم برای رسیدن رویتگر به هدف در حرکت مستقیم تعریف می‌شود.

$$t_f = \rho \frac{\|x^t - x^o\| \|y^t - y^o\|}{V_o} \quad (33)$$

در مراجع اشاره شده با کاهش کواریانس خطا و یا افزایش باند کرامر رانو، متناسب با ضریب ρ به عنوان نسبت زمانی تقرب به هدف، مسیرهای مشابه‌ای را به روش تحلیلی غیرمستقیم و یا عددی (مستقیم) ارائه نموده‌اند. در این مقاله، بهینه‌سازی کل مسیر با رابطه (۲۱) و یافتن مسیر مستقل از فاصله اولیه و یا ضریب تقرب در کمینه زمان ممکن مدنظر است.

۴-۱ تعیین مسیر بهینه با روش پیشنهادی چندجمله‌ای‌های جیبی شف

جیبی‌شف در مساله کاربردی دریایی

در این بخش کارآمدی روش پیشنهادی در مساله کاربردی BOT در رهگیری اهداف دریایی سطحی بررسی می‌شود. بدین منظور محاسبه مسیر رویت‌پذیر در بازه ۵۰۰ متر الی ۱۵۰۰ متر، با سرعت ثابت و بیشینه رویتگر معادل ۱۰ گره دریایی در زمان تقرب ۱۰ تا ۱۰۰ درصد مسیر مستقیم تا رسیدن به هدف انجام پذیرفته است. همچنین بیشینه محدوده دید سونار ۹۰ درجه نسبت به خط دید هدف به عنوان شرایط محدودکننده مطابق رابطه (۳۱) و نرخ نمونه‌برداری حساسه سونار، در هر ثانیه ۱ بار می‌باشد. با بهره‌گیری الگوریتم مدل‌سازی جیبی شف مرتبه ۴ و استفاده از تابع $fmincon$ نرم‌افزار متلب جهت محاسبه کمینه تابع هزینه رابطه (۲۲)، پاسخ مشابه‌ای برای تمامی سناریوهای ارائه شده منتج گردید. در مجموع کمینه تابع هزینه بهینه، در مسیری با مانوری معادل ۱۰ درصد کل زمان تقرب مستقیم به هدف قابل دستیابی است. واضح است کمینه زمان تقرب در تخمین پارامترهای هدف علاوه بر رویت‌پذیری مسیر به باند خطای حساسه اندازه‌گیر نیز وابسته است. مطابق نتایج جدول ۱ مشاهده می‌شود مسیر بهینه با تابع کنترلی θ_{NJ} با تقریب مناسبی به فاصله هدف وابسته نمی‌باشد. حساسیت کمینه تابع هزینه بهینه‌سازی (۲۱) نسبت به پارامتر فاصله مطابق رابطه (۳۴) از درجه ۳- است که به پارامتر کنترلی مفروض وابسته نمی‌باشد. بنابراین مسیر بهینه می‌تواند مستقل از فاصله محاسبه شود. اهمیت این موضوع در محاسبه برخط مسیر بهینه می‌باشد. زیرا هرچند مسیر بهینه پیشنهادی مطابق جدول ۱ تقریباً یکتا است، لیکن در برخی موارد با افزودن شرایط محدودکننده رویتگر نیاز به محاسبه مجدد مسیر بهینه مطابق شرایط جدید مسیر است.

$$\begin{aligned} \min J_N &= F(x_i, c_i) \\ J_N &= \sum_{i=0}^N b_{Ni} L[x(t_i), y(t_i), \theta(t_i), t_i], \quad t_i \in [-1, 1] \\ L[x(t_i), y(t_i), \theta(t_i), t_i] &= \frac{V \sin(\theta(t_i))}{\sqrt{(x(t_i))^2 + (y(t_i))^2}} \end{aligned} \quad (30)$$

که b_{Ni} از رابطه (۲۷) جایگزین می‌شود.

گام سوم: حل مساله بهینه‌سازی با شرایط مرزی دلخواه

ممکن است در طول مسیر مساله BOT محدودیت‌های برای پارامترهای ورودی و سینماتیکی ناظر مانند محدودیت در زاویه دید و یا عبور از موانع مدنظر باشد. این محدودیت‌ها نیز به صورت زیر لحاظ می‌شوند.

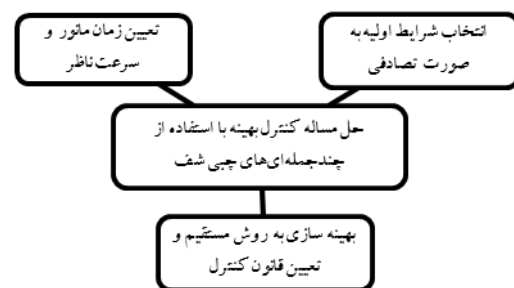
$$\begin{aligned} \text{Equality constraints} \\ G(x_i, c_i, t_i) &= 0, \quad i = 0, 1, \dots, N \\ \text{constrains:} \\ S(x_i, c_i, t_i) &= 0, \quad i = 0, 1, \dots, N \end{aligned} \quad (31)$$

گام چهارم: شرط توقف بهینه‌سازی

$$\begin{aligned} |J_{N+1} - J_N| &< \varepsilon_1, \\ [\Sigma(G^2 + S^2)]^{1/2} &< \varepsilon_2 \end{aligned} \quad (32)$$

اگر شرایط گام چهارم مهیا نشود، $k = k + 1$ مراحل از گام سوم تکرار می‌گردد.

این بخش از بهینه‌سازی مسیر به صورت برون‌خط اجرا و قانون کنترل محاسبه می‌گردد. قانون کنترل بر اساس پارامترهای از پیش تعیین شده t_f و v_{max}^o در صورت وجود شرایط مرزی و محدودیت‌های مسیر محاسبه می‌گردد. روند تخمین مسیر با تحقق قانون کنترل در شکل ۲ آورده شده است. در بخش بعدی با استفاده از شبیه‌سازی، عملکرد روش بهینه‌سازی پیشنهادی با چندجمله‌ای جیبی شف برای مساله BOT مقایسه و کارآمدی آن ارائه می‌شود.



شکل ۲: محاسبه قانون کنترل رویتگر مساله BOT

۴ بررسی کارایی روش پیشنهادی در طراحی سناریوهای بهینه در یک مساله کاربردی

در مساله تعیین مسیر رویتگر همواره مصالحه‌ای بین زمان و خطای نهایی رویت‌پذیری وجود دارد. در این مقاله هدف یافتن مسیر بهینه یکتایی

جدول ۱: مقایسه کمینه تابع هزینه و مسیر بهینه برای مساله BOT

برای فواصل ۰/۵ تا ۱۵ کیلومتری فاصله هدف در ۱۰ درصد زمان تقرب با سرعت ۱۰ گره دریایی ناظر با روش بهینه‌سازی چبی شف مرتبه ۴

| $r(km)$ | 0.5 | 1.5 | 3 | 4.5 | 6 | 7.5 | 9 | 10.5 | 12 | 15 |
|------------------------|--|---|---|---|--|--|--|--|--|---|
| J_N $\rho = 10\%$ | -0.1722 *1-e-17 | -0.2368 *1-e-18 | -0.3702 *1-e-20 | -0.3251 *1-e-21 | -0.5787 *1-e-22 | -0.1517 *1-e-22 | -0.5081 *1-e-23 | -0.2015 *1-e-23 | -0.9044 *1-e-24 | 0.2371 *1-e-24 |
| $N_j(deg)$ | -70.83 -13.00 61.540 88.958 45.711 | -72.84 -14.06 60.9178 89.0597 45.1459 | -73.36 -14.32 60.7615 89.0910 45.0027 | -73.53 -14.41 60.79 89.10 44.95 | -73.62 -14.45 60.682 89.107 44.930 | -73.67 -4.485 60.667 89.111 44.916 | -73.70 -14.50 60.657 89.113 44.906 | -73.73 -14.51 60.647 89.115 44.898 | -73.75 -14.52 60.64 89.11 44.894 | -73.77 -14.53 60.63 89.11 44.88 |

$$\eta_k \triangleq (CRLB(RMS_k)) / (RMS_k) \times 100\% \quad (37)$$

$$RTAMS = \quad (38)$$

$$\sqrt{\frac{1}{(t_f - t_1)M} \sum_{k=t_1+1}^{t_f} \sum_{i=1}^M (\hat{x}_k^i - x_k^i)^2} + \left(\right)$$

در این بخش برای مقایسه و ارزیابی روش پیشنهادی، برخی روش‌های معروف ارائه شده در مراجع معرفی شده است.

تنها روش تحلیلی با تعریف تابع همیلتونین و حل کلاسیک کنترل مسیر بهینه رویت‌پذیر توسط Hammel در مرجع [۱۲] ارائه شده است. با توجه به دشواری حل مسائل کنترل بهینه غیرخطی، در این طراحی جهت امکان‌پذیری حل مساله، مقادیر اولیه معلوم و سمت نسبی مشاهده هدف در زمان نهایی ۹۰ درجه فرض شده است. رابطه کورس بهینه رویتگر و سمت هدف به صورت زیر محاسبه شده است:

$$\theta^\circ = 3\beta_f - 2\beta + \pi/2 \quad (39)$$

که سمت نهایی هدف با رابطه غیرخطی ذیل به نسبت زمانی تقرب مسیر مستقیم (ρ) وابسته است.

$$\rho = \cos^{1/3} [3(\beta_f - \beta_0)] \int_{\beta_0}^{\beta_f} \frac{d\beta}{\cos^{4/3} [3(\beta_f - \beta)]} \quad (40)$$

از روش‌های متداول طراحی مسیر رویتگر به روش حل مستقیم عددی در مرجع [۶] ارائه شده است. در اینگونه روش‌ها، بهینه‌سازی مسیر برای یک گام جلوتر به روش عددی انجام می‌گیرد. اشکال اساسی این روش عدم تضمین بهینه نتایج نهایی و حجم محاسبات بالا به جهت لزوم تکرار حل مساله بهینه در هر گام است. هرچند در مرجع [۱۵]، رابطه خطی کسری (۴۰) برای $\rho = 50\%$ با بهره‌گیری از بسته نرم‌افزاری خاص به روش حل عددی شبه‌گوسی استفاده شده است، لیکن در این مرجع ابزار و رابطه جامعی برای طراحی در تمامی مسائل کاربردی ارائه نشده است.

$$\theta^\circ = \beta + \frac{\alpha}{2}, \quad \text{if } (\beta) < \frac{\alpha}{2}$$

$$\theta^\circ - \beta_0 = a(\beta - \beta_0) + b + \frac{c}{\beta - \beta_0 + d} \quad (41)$$

$$a = 1.045, b = 1.47, c = 0.06794, d = -0.04875$$

$$S_r^J = \frac{r}{J} \frac{\delta}{\delta r} \left(\frac{\dot{\beta}}{r^2} \right) = -3 \quad (34)$$

درمجموع برای تخمین یک هدف، با انتخاب زمان مناسب تقرب (متناسب با خطای حساسه ناظر) می‌توان مسیر بهینه مانور را مستقل از فاصله اولیه مطابق شکل ۲ در ابتدای مانور محاسبه نمود. اهمیت روش پیشنهادی در انتخاب تابع هزینه مستقل از تخمین گر و ارائه یک روش بهینه‌سازی در کل زمان مانور با محاسبات کمینه (مطابق با ابعاد بردارهای متعامد) به منظور اعمال شرایط محدودکننده دلخواه می‌باشد. برای اثبات این ادعا در بخش بعد عملکرد مهمترین روش‌های ارائه شده در مقالات با روش پیشنهادی بررسی می‌شود.

۲-۴ مقایسه کارآمدی روش پیشنهادی به روش‌های ارائه شده در حالت هدف ساکن

عموما مقایسه ردیابی‌های مختلف بر مبنای شبیه‌سازی‌های مونت کارلو انجام می‌شود. در مراجع مختلف برای ارزیابی عملکردی مساله BOT از توابع مختلفی استفاده شده است. از جمله توابع معیار کارآمدی ردیابی می‌توان به (۱) باند کرامر راتو به عنوان شاخص بیشینه عملکرد ممکن تخمینگر و یا مقایسه کارآمدی مسیر بهینه BOT، (۲) معیار ریشه میانگین مربعات خطای فاصله (RMS^1) به عنوان متوسط خطای مونت کارلو در هر مرحله از تخمین، (۳) معیار کارآمدی η^2 فیلتر برای نمایش نرخ همگرایی تخمین به CRLB، (۴) معیار ریشه زمانی میانگین متوسط خطا ($RTAMS^3$) برای عملکرد زمانی تخمین، نام برد. این معیارها برای مقایسه عملکرد فیلترهای مختلف در حالت شبیه‌سازی نیز استفاده می‌شوند [۱۳].

$$CRLB(RMS_k) = \sqrt{J_k^{-1}(x) + J_k^{-1}(y)} \quad (35)$$

$$RMS_k = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\hat{x}_k^i - x_k^i)^2 + (\hat{y}_k^i - y_k^i)^2} \quad (36)$$

¹ Root-Mean Square

² Efficiency

³ Root Time Averaged Mean Square

علاوه بر روش‌های فوق، یک مسیر مارپیچ بهینه S شکل (Spiral) در مسیر مستقیم به هدف برای ارزیابی روش پیشنهادی طراحی می‌شود. همانطور که در بخش مقدمه عنوان شد، هدف این مقاله، کاهش هزینه حرکتی در مانور S شکل و طراحی مسیر یکنای بهینه مانور رویتگر در حالت نامعلوم بودن شرایط اولیه تخمین پارامتر فاصله تا هدف است که انعطاف لازم جهت اعمال محدودیت‌های مانورهای تاکتیکی را داشته باشد. همچنین، روش پیشنهادی با اعمال تابع هزینه در طول مسیر، بایستی بهترین عملکرد را در زمان نهایی نسبت به روش‌های مرسوم دارا باشد. برای همسان‌سازی با محدودیت‌های سایر مانورها، مسیر بهینه پیشنهادی با محدودیت زاویه نسبی دید هدف کمتر از ۹۰ درجه و شرایط نهایی مرزی ۹۰ درجه حل می‌شود. با توجه به اینکه رابطه بین کورس رویتگر و هدف یک رابطه ثابت است، تنها در یک جهت شبیه‌سازی انجام شده است و در این سناریوها سمت هدف صفر درجه نسبت به شمال، سرعت ناظر ۱۰ گره دریایی (۵ متر بر ثانیه)، خطای حساسه ناظر گوسی و با انحراف معیار ۳ درجه فرض می‌شود. مسیر بهینه و خطای رویت‌پذیری با فرض شرایط اولیه معلوم، برای فاصله ۲ کیلومتر با مانور معادل ۳۰۰ ثانیه در شکل‌های ۳-الف و ۲-ب نشان داده شده است. همچنین، برای بررسی حساسیت روش‌ها به شرایط اولیه، نتایج حل در شرایط نامعلوم در قسمت شکل ۳-ج و ۲-د ارائه شده است. در روش پیشنهادی در شکل ۳-ب و ۳-د از ثانیه ۱۴۰ به بعد خطای رویت‌پذیری به کمتر از ۱۰۰ متر بهبود یافته است. با توجه به اینکه در این روش بهینه‌سازی پیشنهادی در تمام مسیر جهت رسیدن به نتیجه نهایی بهینه مدنظر بوده، در ۵۰ درصد نهایی مسیر، باند خطای مطلوبی حاصل می‌شود. همچنین، عدم حساسیت به شرایط اولیه نامعلوم در شکل ۲-ج و ۲-د مشاهده می‌شود. در روش کلاسیک (Hammel)، کنترل مسیر بهینه در شرایط مرزی (انتهای مسیر) به دقت مناسبی همگرا می‌شود، لیکن زمان همگرایی با شرایط معلوم در انتهای زمان رهگیری در شکل ۲-ب و حساسیت بالا به معلوم

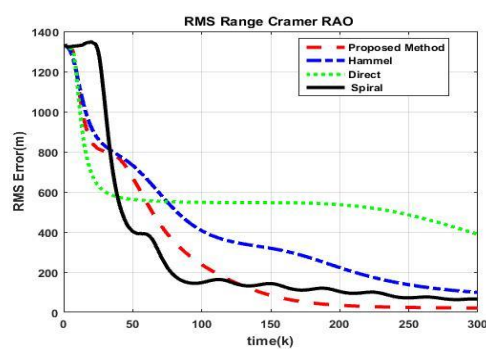
بودن شرایط اولیه و عدم همگرایی در شکل ۲-د نشان ضعف این روش در طراحی مسیر بهینه مساله BOT است. با توجه به اینکه روش مستقیم همواره برای یک گام جلوتر مسیر بهینه محاسبه می‌گردد، در مجموع در زمان نهایی نتیجه مطلوب حاصل نشده است. مانور S که عمدتاً در مسائل کاربردی استفاده شده است، با طی تلفات مسیر اضافی توأم بوده و البته به دقت مطلوب در بسیاری شرایط منجر نمی‌شود. به منظور بررسی رویتگر بهینه در کاهش خطای تخمین فاصله هدف، از تخمینگر EKF مطابق روابط (۱۲) استفاده شده است. نتایج خطای تخمین رویتگرهای بهینه مثال قبل در شکل ۴ آمده است. خطای روش پیشنهادی در انتهای مانور از سایر روش‌ها کمتر است ضمن اینکه مقایسه میزان خطا در شکل ۴ از میزان کاهش خطای کرارماتو در شکل ۳-ب و ۳-د تبعیت می‌کند. برای بررسی جامع نتایج در فواصل خیلی نزدیک ۰/۵ الی ۱۵ کیلومتر، طراحی مسیر بهینه به روش‌های ذکر شده صورت گرفته و خطای تخمین و توابع معیار در زمان نهایی به شرح جدول ۲ محاسبه می‌شوند. نتایج خطای CRLB نشان می‌دهد مسیر بهینه طراحی شده با روش پیشنهادی نسبت به روش‌های دیگر در تمامی حالات کمینه بوده است. کمینه بودن این خطا به‌طور مستقیم در RMS خطای تخمین فاصله موثر است. بدیهی است در صورت بهره‌گیری از تخمینگرهای مناسب، کاهش خطا تا باند کرارماتو امکان بهبود دارد. همچنین کمینه بودن متوسط خطا در طول زمان رهگیری خاصه در بردهای بالا در روش پیشنهادی بهینه است، چراکه در این روش طراحی مسیر بهینه در کل مسیر مدنظر بوده است. هرچند در روش مستقیم در بردهای کوتاه، متوسط زمانی مناسب است، لیکن خطای زمان نهایی از روش پیشنهادی بیشتر است. لازم به ذکر است با توجه به حساسیت روش تحلیلی و مستقیم، پارامتر فاصله اولیه در این دو حالت معلوم فرض شده است.

جدول ۲: مقایسه خطای مسیر بهینه (CRLB)، متوسط خطای تخمین در طول مسیر (RTAMS)، خطای تخمین فاصله در زمان نهایی t_f

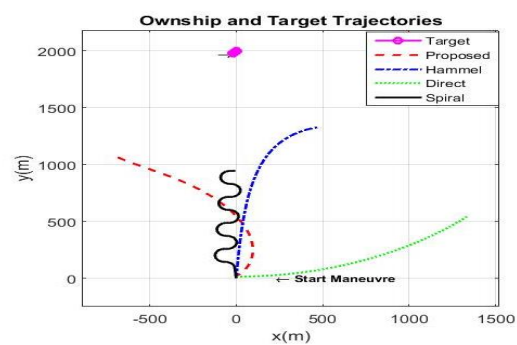
| Distance\ time | 500m/80s | | | 2Km/300s | | | 7km/600s | | | 10km/800s | | | 15km/1000s | | |
|----------------|----------|-----------|---------|----------|-----------|---------|----------|-----------|---------|-----------|-----------|---------|------------|-----------|---------|
| Method | CRLB (m) | RTAMS (m) | RMS (m) | CRLB (m) | RTAMS (m) | RMS (m) | CRLB (m) | RTAMS (m) | RMS (m) | CRLB (m) | RTAMS (m) | RMS (m) | CRLB (m) | RTAMS (m) | RMS (m) |
| Proposed | 6.4 | 1878 | 259 | 18 | 324 | 94 | 146 | 1164 | 786 | 145 | 1572 | 236 | 240 | 3087 | 780 |
| Hammel | 8.9 | 2318 | 482 | 24 | 1674 | 384 | 655 | 3248 | 2811 | 282 | 5446 | 5987 | 394 | 9800 | 10300 |
| Direct | 110 | 941 | 707 | 388 | 403 | 393 | 783 | 3633 | 3703 | 760 | 5453 | 7317 | 546 | 11098 | 12302 |
| Spiral | 7.8 | 2612 | 572 | 65 | 5569 | 3210 | 280 | 1961 | 2270 | 560 | 1661 | 3673 | 1135 | 8236 | 7918 |

(ب)

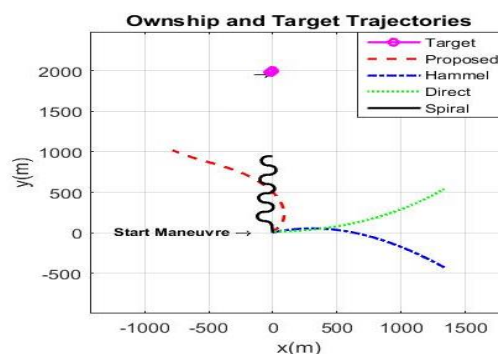
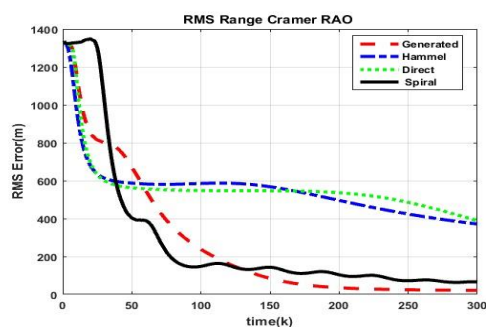
(الف)



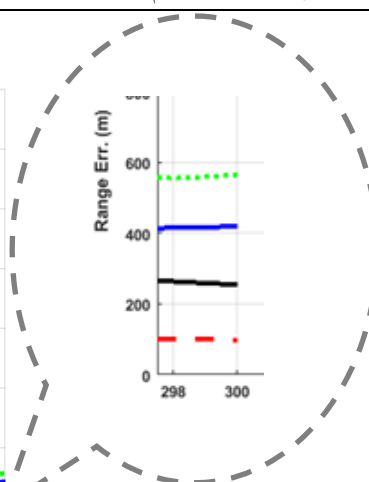
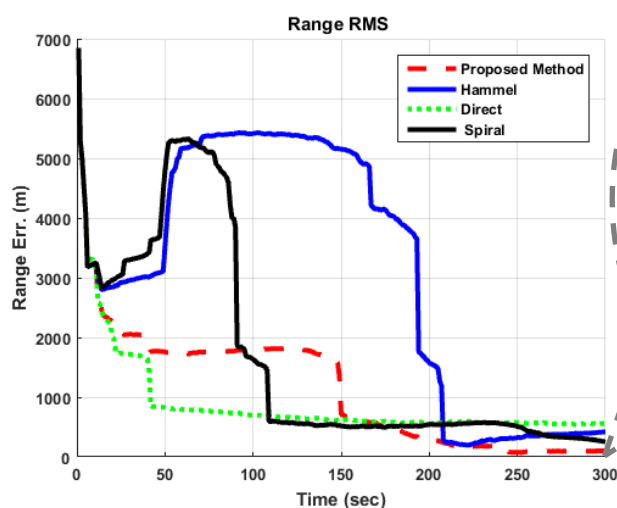
(د)



(ج)



شکل ۳: شرایط اولیه معلوم (الف) مسیر بهینه، (ب) خطای رویت‌پذیری - شرایط اولیه نامعلوم، (ج) مسیر بهینه، (د) خطای رویت‌پذیری



شکل ۴: خطای تخمین فاصله با تخمینگر EKF هدف ساکن (سناریو شکل ۳-الف)

دید هدف می باشد، پارامتر سمت نسبی رویتگر را به عنوان پارامتر ورودی در نظر گرفته و رابطه (۲۹) را به شکل ذیل بازنویسی و گام‌های طراحی مجدداً اجرا می‌شوند.

$$u_i = \theta(t_i) - \beta(t_i) \quad (42)$$

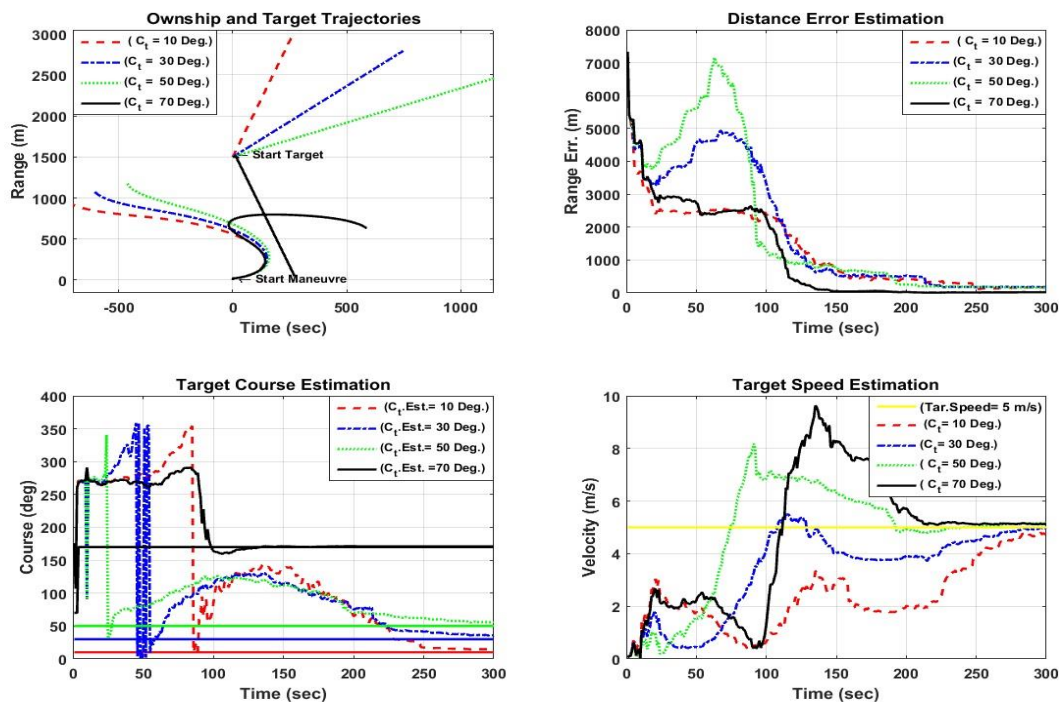
در این بخش برای عمومیت بخشی به حالات ممکن، در دو حالت اهداف دورشونده و نزدیک‌شونده شبیه‌سازی مونت کارلو اجرا شده است. کارآمدی روش پیشنهادی در ردیابی شناورهای سطحی در فضای دو

۳-۴ بررسی کارآمدی روش پیشنهادی در رهگیری اهداف متحرک

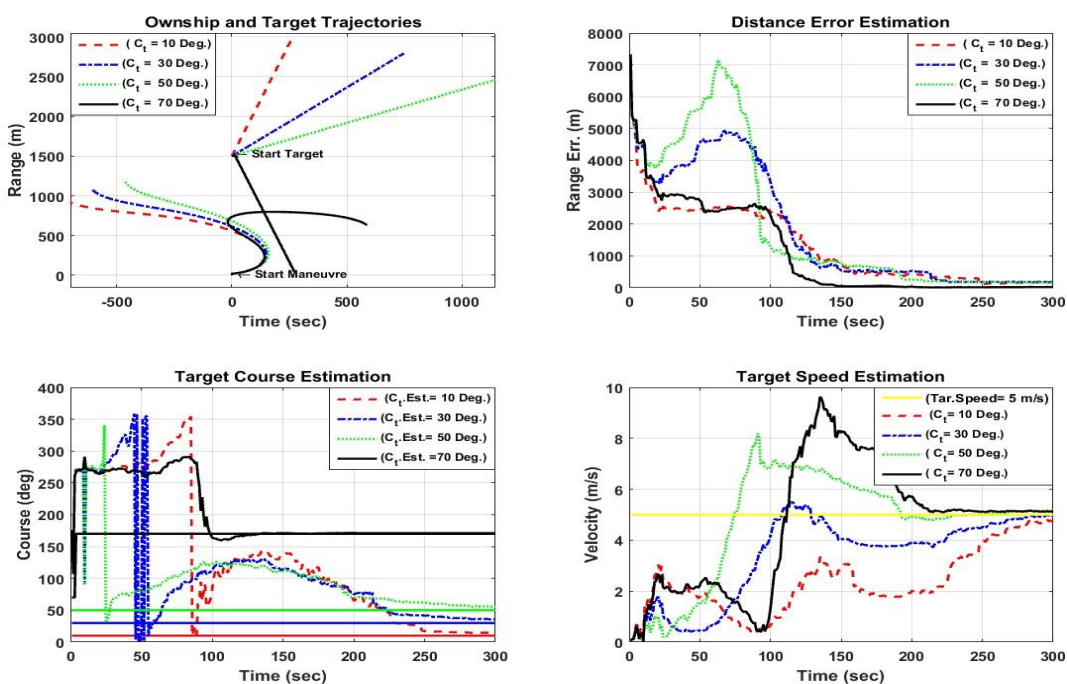
هدف اصلی این مقاله ارائه یک روش مستقل از پارامترهای مجهول رهگیری اهداف متحرک جهت کنترل مسیر بهینه رویتگر است. با توجه به اینکه تنها پارامتر کنترل‌پذیر رویتگر سمت حرکت خود و سمت نسبی

هدف به مقدار واقعی از ثانیه ۴۰۰ به بالا در برد بلند در شکل ۵ و برد کوتاه از ثانیه ۱۵۰ در شکل ۶ نشان داده شده است. بدیهی است زمان همگرایی در برد کوتاه در شکل ۶ سریعتر از برد بلند در شکل ۵ است.

بعدی با فرض نامعلوم بودن شرایط اولیه هدف، مطابق سناریوهای مندرج در جدول ۳ بررسی شده است. نتایج تخمین مطابق سناریوی جدول ۳ در حالت الف و ب به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ آمده است. متناسب با نرخ رویت‌پذیری مسیرهدف با کورس حرکتی مسیرهای نزدیک‌شونده خطای فاصله کاهش یافته است. همگرایی تخمین کورس و سرعت



شکل ۵: نتایج تخمین هدف برد مطابق سناریوهای جدول ۳-الف



شکل ۶: نتایج تخمین هدف برد مطابق سناریوهای جدول ۳-ب

جدول ۳- الف: هدف نزدیک‌شونده در محدوده برد بلند

ردیابی اهداف سطحی توسط ناظر زیردریایی

| No. | V_o m/s | σ deg. | V_t m/s | r Km | $C_{tdeg.}$ | t_f Sec. |
|-----|-----------|---------------|-----------|--------|-------------|------------|
| 1 | 5 | 3 | 5 | 7 | 110 | 800 |
| 2 | 5 | 3 | 5 | 7 | 130 | 800 |
| 3 | 5 | 3 | 5 | 7 | 150 | 800 |
| 4 | 5 | 3 | 5 | 7 | 170 | 800 |

جدول ۳- ب: هدف دورشونده در محدوده برد کوتاه ردیابی

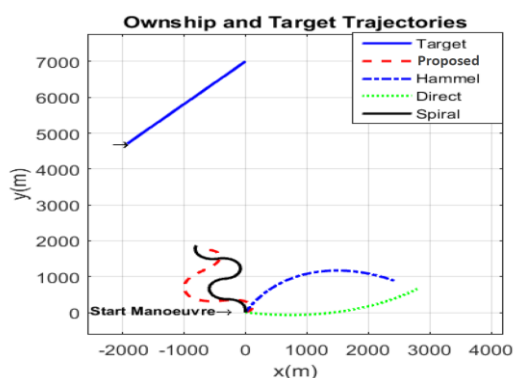
اهداف سطحی توسط ناظر زیردریایی

| No. | V_o m/s | σ deg. | V_t m/s | r Km | $C_{tdeg.}$ | t_f Sec. |
|-----|-----------|---------------|-----------|--------|-------------|------------|
| 1 | 5 | 3 | 5 | 1.5 | 10 | 300 |
| 2 | 5 | 3 | 5 | 1.5 | 30 | 300 |
| 3 | 5 | 3 | 5 | 1.5 | 50 | 300 |
| 4 | 5 | 3 | 5 | 1.5 | 70 | 300 |

۴-۴ طراحی انواع سناریوهای بهینه و در اهداف مانوردار

در این بخش به اختصار، روش پیشنهادی در حالت مانور اهداف با یک مثال بررسی می‌شود. طراحی مسیر رویتگر در ۶۰۰ ثانیه مانور ناظر و تخمین هدف با سناریوی حرکتی در برد ۷ کیلومتر مطابق جدول ۳ و با مانور ۹۰ درجه در ثانیه ۳۰۰، ردیابی مطابق شکل ۷ انجام شده است. همانگونه که پیش‌بینی می‌شد مطابق شکل ۷-الف و ۷-ب در روش پیشنهادی متناسب با زاویه نسبی دید هدف مسیر رویتگر تغییرات کمی بعد از ثانیه ۳۰۰ داشته است. مقایسه شکل ۷-ج و ۷-د نیز این موضوع را

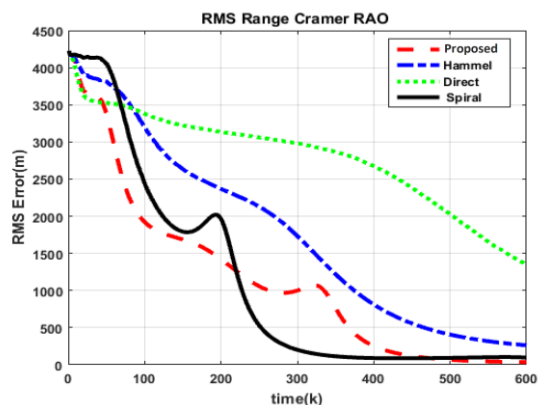
تایید می‌کنند. در روش مستقیم، مانور هدف رویت‌پذیری را در این مثال افزایش داده، لیکن میزان آن از سایر روش‌ها کمتر است. مقایسه خطای تخمین فاصله در شکل ۷-ه و ۷-و نشان می‌دهد مانور باعث افزایش خطای تخمین فاصله شده است. این موضوع به دلیل خطای کواریانس تخمینگر در زمان مانور منتج شده است که بایستی با بهینه‌سازی تخمینگر بهبود یابد که البته موردنظر این تحقیق نمی‌باشد.



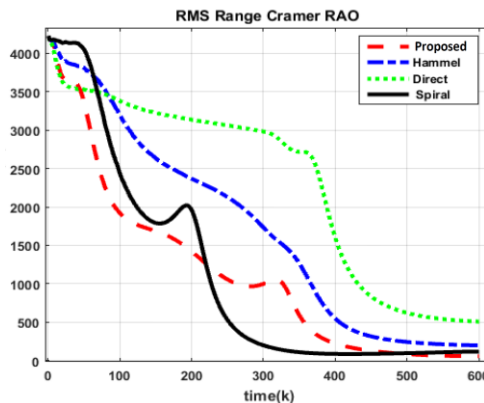
شکل ۷-ب: مسیر رویتگر هدف بدون مانور (فاصله 7km)



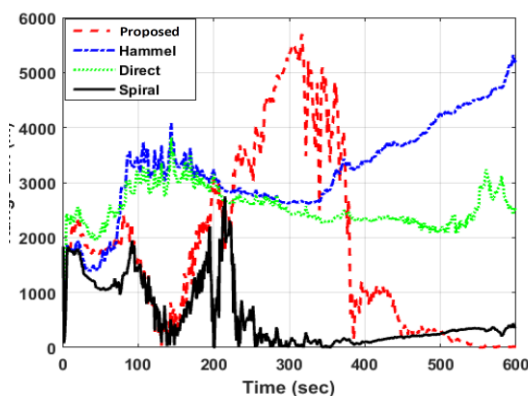
شکل ۷-ف: مسیر رویتگر هدف با مانور (فاصله 7km)



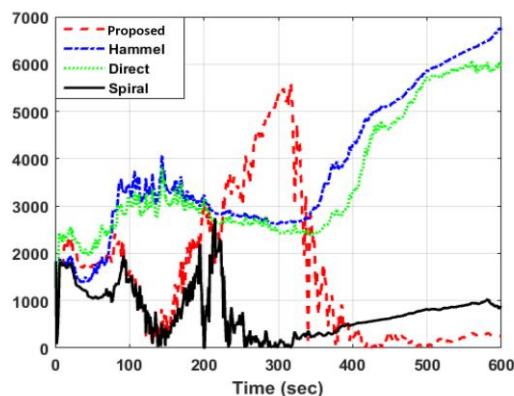
شکل ۷-د: خطای رویت‌پذیری فاصله هدف بدون مانور (فاصله 7km)



شکل ۷-ج: خطای رویت‌پذیری فاصله هدف با مانور (فاصله 7km)



شکل ۷- و: خطای تخمین فاصله هدف بدون مانور (فاصله 7km)



شکل ۸- ه: خطای تخمین فاصله هدف با مانور (فاصله 7km)

- [2] P. I. Reji and V. S. Dharun, "Recursive Multistage Estimator for Bearings only Passive Target Tracking in ESM EW Systems," Indian J. Sci. Technol., vol. 8, no. 26, pp. 1-7, 2015.
- [3] B. Omkar Lakshmi Jagan, S. Koteswara Rao, A. Jawahar, and S. B. Karishma, "Passive target tracking using intercept sonar measurements," Indian J. Sci. Technol., vol. 9, no. 12, pp. 10-13, 2016.
- [4] Bar-Shalom, Yaakov, X. Rong Li, and Thiagalingam Kirubarajan. Estimation with applications to tracking and navigation: theory algorithms and software. John Wiley & Sons, 2004.
- [5] Ristic, Branko, Sanjeev Arulampalam, and Neil Gordon. Beyond the Kalman filter: Particle filters for tracking applications. Artech house, 2004.
- [6] Mahler, Ronald PS. Advances in statistical multisource-multitarget information fusion. Artech House, 2014.
- [7] S. C. Nardone, A. G. Lindgren, K. A. I. F. Gong, and M. Er, "Fundamental Properties and Performance of Conventional Bearings-Only Target Motion Analysis," IEEE Trans. Automatic Control, Vol. AC-29, no. 9, Sep. 1984.
- [8] J.-P. Le Cadre, "Discrete-Time Observability and Estimability Analysis for Bearings-Only Target Motion Analysis," IEEE Trans. Aerosp. Elect. Syst. VOL. 33, NO. 1 JANUARY 1997.
- [9] K. Gerlach, "Comments on Discrete-Time Observability and Estimability for Bearing-Only Target Motion Analysis," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., no. 13, pp. 1361-1367, 1998.
- [10] J. a. Fawcett, "Effect of course maneuvers on bearings-only range estimation," IEEE Trans. Acoust., vol. 36, no. 8, pp. 1193-1199, 1988.
- [11] P. T. Liu, "An optimum approach in target tracking with bearing measurements," J. Optim. Theory Appl., vol. 56, no. 2, pp. 205-214, 1988.
- [12] S. E. Hammel, P. T. Liu, E. J. Hilliard, and K. F. Gong, "Optimal observer motion for localization with bearing measurements," Comput. Math. with Appl., vol. 18, no. 1-3, pp. 171-180, 1989.
- [13] Y. Oshman and P. Davidson, "Optimization of observer trajectories for bearings-only target localization," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 35, no. 3, pp. 892-902, 1999.

۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله با روش شبیه‌سازی مونت کارلو نشان داده شد که روش پیشنهادی بهینه‌سازی با چندجمله‌ای‌های چبی شف برای طراحی مسیر بهینه روترگر مساله BOT با یک تابع کنترل منحصر به فرد و مستقل از پارامترهای نامعلوم اولیه قابل محاسبه است. کارآمدی روش پیشنهادی برای اهداف ساکن و متحرک با مانور ارزیابی شد. بهره‌گیری از دقت بالای روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک (روش‌های غیرمستقیم) در مدل‌سازی اولیه به همراه بهره‌گیری از روش‌های حل مستقیم به دلیل پایداری بالا به پارامترهای نامعلوم و افزایش سرعت حل با استفاده از چندجمله‌ای متعامد (جهت رفع پیچیدگی‌های حل تحلیلی تابع هامیلتونین) مشخصه اصلی این روش است. از دیگر مزایای طراحی مسیر با تعقیب و تقرب دلخواه، در ابتدای شروع مانور است. علاوه بر آن همگرایی بالا، سرعت و حجم محاسبات پایین (نسبت به سایر روش‌های حل مستقیم) و همچنین استقلال محاسبه مسیر بهینه از پارامترهای نامعلوم اولیه و مرزی در مسائل کاربردی BOT نشان داده شد. هرچند در حالت اندازه‌گیری بدون خطا محاسبه زمان همگرایی قابل محاسبه است، لیکن با وجود خطای حساسه اندازه‌گیر، کمینه زمان در این پژوهش از شبیه‌سازی محاسبه شده است. تحقیقات آتی در این حوزه شامل محاسبه زمان بهینه جهت همگرایی مورد نظر متناسب با خطای حساسه اندازه‌گیر است تا به صورت برخط همگرایی مساله BOT تضمین گردد. همچنین بررسی عملکرد روش پیشنهادی برای اهداف مانوردار و یافتن معیارهای تطبیقی سریع متناسب با توابع معیار روتر پذیر برای همگرایی تخمین‌گرهای اهداف مانوردار مدنظر تحقیقات بعدی می‌باشد.

مراجع:

- [1] K. Dogancay, "UAV path planning for passive emitter localization," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 48, no. 2, pp. 1150-1166, 2012.

methods." Math. Comput. Simul. Vol. 121, pp. 95-108, 2016.

[۱۹] مقداد محمدی، حسین قلی زاده نرم، "تطبیق کوواریانس های نویز فیلتر کالمن توسعه یافته در ردیابی هدف از روی سمت به روش بازگشتی"، مجله کنترل جلد ۱۰، تابستان ۱۳۹۵، صفحه ۷۲-۵۵ ISSN 2008-8345, Journal of Control, Vol. 10, No. 2, Summer 2016

[20] Elsayed ME, and M. El-Kady. "Chebyshev finite difference approximation for the boundary value problems." Math. Comput. Simul. vol. 139.2-3, pp. 513-523, 2003.

[21] P. Taylor, "A Chebyshev Finite Difference Method For Solving A Class Of Optimal Control Problems," Int. J. Comput., no. February 2013, pp. 37-41, 2010.

[14] A.N. Bishop, "Bearing-Only Localization using Geometrically Constrained Optimization," IEEE Trans. Aeros. Elect. Syst. Vol. 45, Jan. 2009 .

[۱۵] امیر حسین نایی، ناصر پریر، "تعیین مسیر رویت گر در موقعیت یابی تنها با زاویه سمت با در نظر گرفتن محدودیت میدان دید"، مجله کنترل جلد ۸، بهار ۱۳۹۳ و صفحه ۷۱-۵۵-۲۰۰۸-۳۴۵، Journal of Control, Vol. 10, No. 2, Summer 2016 ISSN

[16] J. P. Helferty and D. R. Mudgett, "Optimal observer trajectories for bearings only tracking by minimizing the trace of the Cramer-Rao lowerbound," Proc. 32nd IEEE Conf. Decis. Control, pp. 936-939, 1993.

[17] J. T. Betts, "Survey of Numerical Methods for Trajectory Optimization," J. Guid. Control. Dyn., vol. 21, no. 2, pp. 193-207, 1998.

[18] Mezzadri, Francesco, and Emanuele Galligani. "A Chebyshev technique for the solution of optimal control problems with nonlinear programming

پیوست الف:

متغیرهای استفاده شده در مقاله به شرح ذیل می‌باشند:

$$\dot{r} = [\dot{x} \quad \dot{y}]^T, \bar{r}$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \hat{r}, \bar{r}$$

$$F_k$$

$$\beta, z, \hat{\beta}$$

$$\dot{\beta}$$

$$\theta$$

$$\omega = [\omega_x; \omega_y]$$

$$Q = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 \end{bmatrix}$$

$$v$$

$$\hat{X}_{k|k}, \hat{X}_{0|0}$$

$$P_{k|k}, P_{0|0}$$

$$\hat{X}_{k+1|k}, P_{k+1|k}$$

$$FIM = J, J^{-1}$$

$$H, \hat{H}$$

$$T, t_f, \rho$$

$$X^T$$

- سرعت نسبی، حدس اولیه با واریانس σ_r^2

- فاصله نسبی هدف، تخمین فاصله، حدس اولیه با توزیع واریانس σ_r^2

- ماتریس انتقال حالت در لحظه k

- زاویه سمت واقعی و اندازه گیری شده هدف و تخمین آن به ترتیب

- نرخ تغییرات سمت هدف

- جهت حرکت ناظر (کورس ناظر)

- عدم قطعیت سرعت نسبی هدف در جهت x و y به صورت مستقل با

میانگین صفر و کوواریانس σ_x^2 و σ_y^2

- ماتریس کوواریانس متغیر تصادفی بردار w

- نویز اندازه گیری گوسی $N(0, \delta_\beta^2)$

- بردار تخمین حالت در لحظه k و تنظیم شرایط اولیه

- ماتریس کوواریانس خطای تخمین در لحظه k و تنظیم کوواریانس اولیه

- بردار پیش‌بینی تخمین حالت و کوواریانس خطا

- ماتریس اطلاعات فیشر و کرامر رانو

- گرادیان بردار اندازه گیری به بردار حالت و تخمین آن

- زمان نمونه برداری، زمان نهایی مانور و نسبت زمان مانور به زمان رسیدن

به هدف در مسیر مستقیم

ترانهاده بردار X