



## طراحی هدایت غیر خطی پایدار یک وسیله زیر آبی در خط اثر شناور توسط مسیر تخمین زده شده با فیلتر پارتیکل

علیرضا باصحبت‌نوین‌زاده<sup>1\*</sup>، مجتبی اسدی‌ماتک<sup>2</sup>

1- دانشیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
2- دانشجوی دکتری مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
\* novinzadeh@kntu.ac.ir، 1656983911، صندوق پستی

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 07 اسفند 1395  
پذیرش: 27 فروردین 1396  
ارائه در سایت: 16 اردیبهشت 1396

کلید واژگان:

هدایت

وسيله زیر آبی

خط اثر شناور

فیلتر پارتیکل

لیاپانوف

### چکیده

هدایت یک وسیله زیر آبی در مسیر خط اثر شناور هدف به دلیل پیچیدگی هدایت در آب و همچنین محدودیت‌های حسگرها همچنان به عنوان اصلی‌ترین روش هدایت آشیانه‌یابی به حساب می‌آید. از معایب هدایت خط اثر شناور می‌توان به حرکت زیگزاگی جهت کشف مجدد آن اشاره کرد که با توجه به کاهش سرعت خطی نزدیک شدن به هدف گاهی به آن نرسیده و اصابت و تخریب ناتمام می‌ماند. به همین علت ایده‌های مختلفی برای بهبود حرکت در مسیر خط اثر شناور مطرح شده است که هر کدام دارای محاسن و معایبی هستند. مدل خط اثر شناور با توجه به پیچیدگی و همچنین ناپایداری آن جهت استخراج مشخصات، به پدیده‌ای بسیار غیر خطی تبدیل شده و هدایت در آن به عنوان گلوگاهی در وسیله‌های زیر آبی است. با توجه به اینکه ناحیه کشف خط اثر شناور توسط حسگر به اندازه کافی گسترده نیست، کشف آن فقط در نزدیکی خود ممکن می‌شود، بنابراین مسیر واقعی آن قابل کشف نبوده و در نتیجه روش هدایتی پیشرفته در دسترس نیست. به همین علت پیشنهاد می‌شود جهت هدایت خط اثر شناور از روشی برای تعقیب مسیر ناشناخته استفاده شود. این قانون هدایت شامل دو بخش تخمین مسیر خط اثر شناور و هدایت غیر خطی در آن است. روش تخمین مسیر با استفاده از فیلتر پارتیکل انجام شده است که توانایی تخمین مسیرهای غیر خطی را داراست. اثبات پایداری روش هدایتی غیر خطی نیز از طریق لیاپانوف انجام می‌شود.

## Design of stable nonlinear guidance of an underwater vehicle in the ship wake via estimated path by particle filter

Alireza Basohbat Novinzadeh<sup>\*</sup>, Mojtaba Asadi Matak

Department of Aerospace Engineering, Khaje Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran  
\* P.O.B. 1656983911 Tehran, Iran, novinzadeh@kntu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 25 February 2017  
Accepted 16 April 2017  
Available Online 06 May 2017

#### Keywords:

Guidance  
Underwater vehicle  
Wake  
Particle filter  
Lyapunov

### ABSTRACT

Guidance of an underwater vehicle in the wake of target due to the complexity of guidance in water and also sensor limitations is still the most important homing guidance method. Disadvantages of wake guidance can be mentioned as zigzag motion for rediscovering the wake in its path which, according to the decreasing linear speed of approaching the target, sometimes does not reach the target and collision fails. Therefore, various ideas with both positive and negative aspects have been introduced to improve movement in the wake path. According to complexity of the wake model and also its instability in extracting its parameters, it is a very nonlinear phenomenon and guidance in it is problematic in underwater vehicles. Since the wake detection area by the sensor is not wide enough, wake is just discovered nearby. Hence the real wake path is not detectable and therefore advanced guidance method is not available. For this reason, it is suggested that a method of unknown path tracking be used for the wake guidance. This guidance law consists of two parts of path estimation and nonlinear guidance. The estimation method is performed using particle filter that has the ability to estimate nonlinear paths. The stability proof of nonlinear guidance method is done by Lyapunov.

### 1- مقدمه

وسيله‌های زیر آبی اطلاعات حرکتی هدف مورد نیاز است، اما در روش هدایت خط اثر شناور تنها اطلاعات مربوط به مسیر خط اثر مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به این‌که روش‌های هدایتی معمول قابل استفاده نیستند، روش هدایتی کارا برای تعقیب خط اثر شناور، روشی بر پایه اطلاعات خط اثر و حرکت وسیله خواهد بود [2].  
وسيله‌های زیر آبی کنونی تنها یک حسگر صوتی (سونار) روی بدنه خود

در روش‌های پیشین هدایت خط اثر شناور از الگوریتم‌های ورود و خروج استفاده می‌شود که در آن هیچ‌گونه اعتبارسنجی محاسباتی برای کارایی و پایداری آن‌ها انجام نمی‌گیرد [1]. علاوه بر این مشخصات حلقه داخلی (دینامیک و کنترل‌کننده) در نظر گرفته نمی‌شود، در نتیجه روش هدایتی مستخرج به صورت عملی قابل استفاده نیست. در بیشتر روش‌های هدایتی

### Please cite this article using:

A. Basohbat Novinzadeh, M. Asadi Matak, Design of stable nonlinear guidance of an underwater vehicle in the ship wake via estimated path by particle filter, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 260-266, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

در این مقاله با استفاده از فیلتر پارتیکل مسیر خط اثر شناور توسط نقاط مرجع تولید شده و روش هدایتی روی آن نقاط پیشنهاد می‌شود که نقش بسیار مهمی در تعیین بهینگی روش هدایت در خط اثر شناور داراست. به این صورت که یک وسیله زیرآبی توسط تلفیق اطلاعات حسگرهای خود که در بخش‌های بعد راجع به آن توضیح داده خواهد شد، مسیر واقعی خط اثر شناور تخمین زده شده و نقاط مرجعی در آن ساخته می‌شود، سپس با استفاده از قانون هدایت غیرخطی رابطه هندسی، بین وسیله و مسیر مورد انتظار تعریف شده و روش هدایتی مؤثر پیشنهاد می‌شود. در مرجع [7] یک الگوریتم کشف و تعقیب خط اثر شناور برای ردیابی شناور استفاده شده است. آشفتگی قدرتمند تولید شده توسط پروانه شناور هدف برای تخمین جهت اولیه حرکت آن استفاده شده است، سپس با استفاده از ویژگی‌های خطی مرتبط با خط اثر شناور و حسگر صوتی فعال با فرکانس بالا جهت اندازه‌گیری اکوی بازگشتی و فیلتر کالمن به تعقیب نقطه شروع خط اثر شناور و در نتیجه شناور هدف پرداخته شده است. در این مقاله دلیل استفاده از فیلترهای ذره‌ای به جای فیلترهای کالمن این است که اکوی اندازه‌گیری شده یک تابع غیرخطی از موقعیت هدف است و اختلال اندازه‌گیری نیز به صورت غیرگوسی است، علاوه بر این نسبت به روش با فیلتر کالمن نیاز به نقطه شروع خط اثر شناور ندارد. در ادامه مقاله مدل خط اثر شناور و نظریه‌ای برای تأیید کشف خط اثر شناور بررسی خواهد شد سپس با استفاده از روش فیلترهای پارتیکل مسیر خط اثر شناور تخمین زده شده و با استفاده از روش هدایت غیرخطی به همراه تحلیل غیرخطی لپانوف در خط اثر شناور هدایت می‌شود. در ادامه با استفاده از شبیه‌سازی، روش هدایت غیرخطی برای تعقیب مسیر مورد اعتبارسنجی قرار گرفته و سپس با استفاده از مسیر تخمین زده شده توسط فیلتر پارتیکل در هدایت وسیله در مسیر خط اثر شناور بررسی می‌شود. در انتها به صورت خلاصه مقاله جمع‌بندی می‌شود.

## 2- شناسایی خط اثر شناور

### 2-1- مدل خط اثر شناور

مدل‌های زیادی برای خط اثر شناورهای سطحی پیشنهاد شده است. در این پیشنهادیه مدل خط اثر شناور به صورت شکل 2 مورد استفاده قرار می‌گیرد. طول خط اثر شناور عبارت از رابطه (1) است.

$$L_{wake} = C_A \cdot V_M \quad (1)$$

در آن  $C_A$  یک ثابت و در شرایط مختلف دریا معمولاً 180 در نظر گرفته می‌شود و  $V_M$  سرعت شناور است [3].

عرض خط اثر شناور نیز از رابطه (2) قابل محاسبه است.

$$W_{wake} = \begin{cases} 0.5B + L_{wake} \tan \alpha & L_{wake} \leq B \cot \alpha \\ 2.5B & L_{wake} > B \cot \alpha \end{cases} \quad (2)$$

در آن  $B$  عرض شناور و  $\alpha$  زاویه انحراف خط اثر شناور است [3].

مقدار اکوی بازگشتی مهم‌ترین ویژگی خط اثر شناور است که می‌تواند

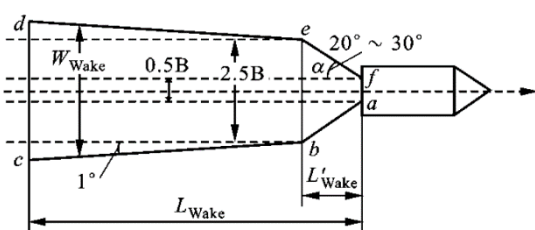


Fig. 2 Schematic of wake geometry

شکل 2 شماتیک هندسه خط اثر شناور [3]

و در راستای عمودی دارند. طریقه عملکرد حسگر صوتی چنان است که هرگاه سیگنال‌های صوتی ارسالی از آن به سطح آب برخورد کنند، موجی ضعیف‌تر اما با همان فرکانس ارسالی دریافت می‌شود که نشان‌دهنده این موضوع که وسیله هنوز زیر خط اثر شناور قرار نگرفته است. اگر امواج صوتی ارسالی با خط اثر شناور برخورد کند به دلیل وجود حباب‌های خط اثر، فرکانس برگشتی و دامنه آن تحت تأثیر قرار می‌گیرد که پس از انتگرال‌گیری از موج بازگشتی چنانچه شرط آستانه برآورده شود، وسیله بودن در زیر خط اثر شناور را تأیید می‌کند. برای شبیه‌سازی مسیر حرکت وسیله زیرآبی به چهار ناحیه تقسیم شده است. این چهار ناحیه شامل دو قسمت داخل خط اثر شناور و دو قسمت در بیرون خط اثر شناور است.

الگوریتم فعلی یک وسیله زیرآبی بدین صورت است که در نخستین برخورد به لبه خط اثر شناور در هنگام ورود، مسیر مستقیم‌الخط خود را طی می‌کند تا از خط اثر شناور برای بار اول خارج شود. سپس با سرعت زاویه‌ای  $w_1$  به مدت  $t_1$  در جهت ساعتگرد چرخیده و پس از آن به مدت  $t_2$  و با سرعت زاویه‌ای  $w_2 > w_1$  باز هم در همان جهت ساعتگرد می‌چرخد. چنانچه وسیله هنوز به زیر خط اثر شناور وارد نشده باشد با سرعت زاویه‌ای  $w_3 > w_2$  می‌چرخد تا دوباره وارد خط اثر شناور شود.

شکل 1 مسیر حرکت یک وسیله زیرآبی را با زوایای ورود متفاوت 20، 50 و 80 که در متلب شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد.

با توجه به شکل 1 می‌توان عدم عملکرد مناسب روش هدایت خط اثر شناور را نشان داد. برای نمونه در زاویه خروج 50 درجه در سیکل دوم، وسیله حدود 40 متر از مرز بالایی خط اثر شناور فاصله گرفته است که با توجه به سرعت هدف به هیچ وجه بهینه و مناسب نیست. هدف این مقاله استفاده از فیلتر پارتیکل جهت تخمین مسیر خط اثر شناور و به‌کارگیری هدایت غیرخطی پایدار در مسیر تخمینی است که یک وسیله زیرآبی توسط آن بتواند مسیر بهینه‌تری در خط اثر شناور مخصوصاً در شرایط مانور هدف بییامد.

در مرجع [2] با استفاده از آرایش 2 حسگری، هدایت خط اثر شناور به صورت مقاوم‌تری نسبت به آرایش تک حسگری که در شکل 1 مورد بررسی قرار گرفت، انجام شده است، اما حرکت در خط اثر شناور همچنان به صورت زیگزگی شدید است. در مرجع [3] روشی برای مدل کردن خط اثر شناور و استفاده از آن در شبیه‌سازی هدایت در خط اثر شناور ارائه شده است. در مرجع [6] آرایش سه حسگری برای بهبود حرکت زیگزگی در خط اثر شناور معرفی شده است.

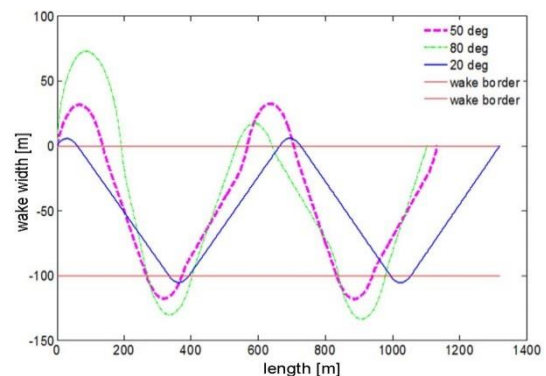


Fig. 1 Path simulation of an underwater vehicle with different entry angles

شکل 1 شبیه‌سازی مسیر حرکت یک وسیله زیرآبی با زوایای ورود مختلف

وجود دارد که در ادامه به شرح مختصری از آن پرداخته شده است.

در مرجع [7] یک الگوریتم تعقیب برای کشف و ردیابی شناور براساس تصاویر پی‌درپی حسگر صوتی فعال از خط اثر شناور تشریح شده است. اختلال قوی حاصل از چرخش پروانه شناور هدف برای تخمین سمت و جهت نقطه شروع خط اثر مورد استفاده قرار می‌گیرد، سپس یک ویژگی خطی مرتبط با خط اثر شناور توسط مکان اندازه‌گیری تخمین سمت هدف تعیین می‌شود و توسط نقشه و نرمالیزه کردن مکان، تعداد اندازه‌گیری‌های اشتباه کاهش می‌یابد و فیلتر کالمن برای تعقیب نقطه شروع خط اثر شناور و در نتیجه هدف مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله با توجه به این‌که اکوی دریافتی از خط اثر شناور یک تابع غیرخطی از مکان هدف و همچنین اختلال اندازه‌گیری غیرگوسی است، از فیلتر پارتیکل به جای فیلتر کالمن استفاده می‌شود [8]. در نتیجه در مقایسه با روش مرجع [7] نیاز به وجود نقطه شروع خط اثر در داخل محدوده جستجو نیست.

الگوریتم تعقیب خط اثر شناور با استفاده از فیلتر پارتیکل به صورت زیر عمل می‌کند:

الف- تعیین وجود خط اثر شناور در داخل محدوده جستجو: هر پرتوی منبع به صورت عمود بر محور عرض خط اثر شناور به بخش‌های با حجم 10 مترمکعب تابیده می‌شود. برای هر منبع سطح اکوی دریافتی از بخش‌های 10 مترمکعبی جمع می‌شود. اگر این حاصل جمع از منابع با موقعیت‌های متوالی بیشتر از حد آستانه از پیش تعیین شده باشد، وجود خط اثر شناور در آن فاصله تأیید می‌شود.

ب- یافتن جهت خط اثر شناور: با استفاده از مدل خط اثر شناور و از طرفی برای هر پرتو از منبع که به خط اثر شناور تابیده می‌شود، ماکزیمم اکوی دریافتی و مکان آن تعیین می‌شود. مکان اکوهای ماکزیمم از بخش‌های متوالی خط اثر شناور می‌تواند محور طولی خط اثر شناور و در نتیجه جهت خط اثر شناور را به دست دهد.

پ- استفاده از روش فیلتر پارتیکل برای ردگیری: پس از تعیین مکان و جهت خط اثر شناور، موقعیت هدف با استفاده از اندازه‌گیری اکوی خط اثر شناور قابل محاسبه می‌شود. ارتباط بین اکوی دریافتی و موقعیت هدف می‌تواند با استفاده از مدل خط اثر شناور فرموله شود. ردگیری موقعیت هدف با استفاده از روش فیلتر پارتیکل و با شرح مختصر زیر انجام می‌گیرد.

پ-1- تنظیم اولیه اجزاء و وزن‌های آن‌ها برای محورهای  $X$  و  $Y$ : بردار حالت تخمین  $x$  و  $y$  در نظر گرفته شده‌اند. توابع چگالی احتمال برای محورهای هدف با 100 نمونه در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به استقلال بین متغیر طول و عرض هدف وزن‌های  $w_x^i$  برابر 0.01 مقداردهی می‌شوند، به طوری که  $i$  شماره نمونه است.

پ-2- اندازه‌گیری سطح اکوی بازگشتی به صورت رابطه (3) است.

$$M = f(x, y) + N \quad (3)$$

در آن  $M$  مقدار اندازه‌گیری را بیان می‌کند.  $(x, y)$  نقطه اندازه‌گیری و  $N$  اختلال اندازه‌گیری است.  $p(M|r)$  احتمال وجود مقدار اندازه‌گیری  $M$  در فاصله طولی  $r$  از هدف است که با استفاده از 100 بار شبیه‌سازی استخراج می‌شوند.  $p(M|x_a)$  و  $p(M|y_a)$  نیز همین مقدار را به صورت روابط (4,5) خواهند داشت.

$$x_a = x - x_m = r \cos \theta \quad (4)$$

$$y_a = y - y_m = r \sin \theta \quad (5)$$

در آن  $x$  و  $y$  مختصات نقطه هدف،  $x_m$  و  $y_m$  مختصات نقطه

برای کشف و تعقیب استفاده شود.

زمانی که حباب‌های آشفته داخل خط اثر شناور به اندازه کافی موجود باشند قدرت شناسایی خط اثر شناور هدف افزایش می‌یابد، از طرفی تلفات انتقال صوت بیشتر شده و سطح اکوی دریافتی از خط اثر شناور کمتر خواهد شد. استفاده از منابع صوتی با فرکانس‌های مختلف نیز می‌تواند در کشف بهتر خط اثر شناور کمک کند [4]. تعقیب پس از کشف مطمئن خط اثر شناور توسط تغییرات نمونه صوتی دریافتی انجام می‌شود، بدین صورت که اکوی صوتی بازگشتی به دلیل برخورد به آشفته‌گی حاصل از ترکیبگی حباب و همچنین مسیر رفت و برگشت در بازگشت خود دارای دامنه کمتر و از طرفی فرکانس متفاوت با فرکانس ارسال خواهد بود [5]. در ادامه حسگر خط اثر شناور به اختصار بررسی شده است.

## 2-2- حسگر خط اثر شناور

ناحیه کشف خط اثر شناور توسط مکان قرارگیری حسگر و زاویه اندازه‌گیری آن تعیین می‌شود. در این مقاله از آرایش سه حسگری با زاویه محوری نسبت به هم استفاده شده است. دلیل استفاده از این نوع آرایش در موارد زیر خلاصه می‌شود:

الف- امکان استفاده از حسگرهای موجود و عدم نیاز به بازطراحی حسگری

ب- تعیین جهت خط اثر شناور با توجه به تأخیر زمانی در تشخیص حسگرهای جانبی

پ- تشخیص به صورت پیش‌بین به دلیل وجود زاویه حسگرهای جانبی نسبت به محور سمت وسیله زیرآبی

ت- تأیید خط اثر شناور توسط حسگر میانی- بعد از تشخیص لبه خط اثر شناور توسط یکی از حسگرهای جانبی، تشخیص توسط حسگر میانی می‌تواند لبه خط اثر شناور را تأیید کرده و نقطه برخورد را تعیین کند.

شکل 3 نمایی از این نوع آرایش را نشان می‌دهد.

اگر خط اثر شناور توسط حداقل دو عدد حسگر کشف شود، وسیله داخل خط اثر شناور در نظر گرفته می‌شود. با توجه به این‌که حسگرهای موجود فقط وجود و یا عدم وجود خط اثر شناور را تشخیص می‌دهند، در نتیجه اطلاعاتی راجع به شدت و جهت آن در اختیار قرار نمی‌دهند. علاوه بر این شکل و ناحیه دقیق خط اثر شناور ناشناخته است، در نتیجه شناخت مکان مرز واقعی خط اثر شناور هم بسیار مشکل است؛ بنابراین نقطه بین نقاط قطع توسط دو حسگر به عنوان مرز در نظر گرفته می‌شود. این نقطه در منطق هدایتی استفاده می‌شود.

## 3- تخمین مسیر خط اثر شناور با استفاده از فیلتر پارتیکل

الگوریتم‌های جدیدتری برای تعقیب هدف توسط روش‌های فیلترینگ بیضوی

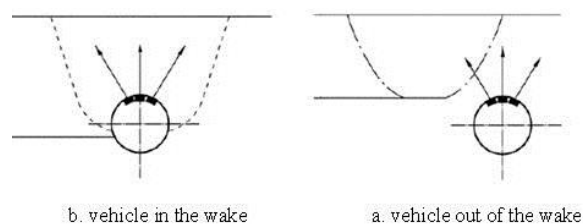


Fig. 3 Schematic of wake sensor

شکل 3 شماتیک حسگر خط اثر شناور [6]

[9]. اغلب روش حلقه‌های داخلی و خارجی مجزا به دلیل سادگی و روش‌های شناخته شده طراحی حلقه داخلی کنترل مورد استفاده قرار می‌گیرد. کنترلرهای خطی معمولاً برای هدایت حلقه خارجی و به طور معمول، کنترلرهای PD برای خطای تعقیب استفاده می‌شوند. اگر مسیر مورد انتظار شبیه یک خط راست باشد، این روش ساده برای عملکرد حلقه خارجی به خوبی عمل می‌کند. در صورتی که هدایت در مسیر پیچیده خمیده شکلی مورد نظر باشد، بازخورد خطی از خطای تعقیب نمی‌تواند نیازهای هدایتی را برآورده سازد. در ادامه منطق هدایتی برای غلبه بر محدودیت‌های بازخورد کنترلی در دنبال کردن مسیرهای منحنی شکل مورد بررسی قرار گرفته است. روش‌های مختلف هدایتی برای موشک‌های برد کوتاه با در نظر گرفتن نقاط فرضی روی مسیر مورد انتظار نظیر هدایت ناوبری تناسبی که تلاش کنترلی پایینی داشته و به صورت گسترده استفاده می‌شوند [10-12].

یک جزء مهم در ناوبری تناسبی استفاده از تغییر خط دید بین هدف و موشک است که شبیه به خصوصیتی در منطق هدایت در مسیر است با این تفاوت که برخلاف ناوبری تناسبی، سرعت هدف در هدایت تعقیب مسیر وارد نمی‌شود. در ادامه بیشتر به ارتباط بین ناوبری تناسبی و منطق پیشنهادی هدایت در مسیر پرداخته می‌شود.

در ادامه به معرفی روش هدایتی و خصوصیات آن پرداخته می‌شود. به دلیل این‌که روش هدایتی مورد نظر در استفاده ساده است مزایای متعددی می‌توان برای آن برشمرد که از آن میان به برخی اشاره می‌شود.

الف- شامل کنترل‌کننده‌های مشتقی و تناسبی برای کنترل خطاست.

ب- شامل پارامتری برای پیش‌بینی مسیر است که به تعقیب دقیق‌تر مسیرهای منحنی‌وار کمک می‌کند.

پ- از سرعت لحظه‌ای وسیله در الگوریتم استفاده می‌کند که این فاکتور سینماتیکی یک خصوصیت تطبیقی برای مقابله با تغییرات سرعت وسیله در حضور اغتشاشات به هدایت می‌افزاید.

#### 2-4- تبیین روش هدایت

منطق هدایتی مورد نظر یک نقطه مرجع در مسیر مورد انتظار انتخاب کرده و با استفاده از آن فرمان شتاب جانبی را تولید می‌کند.

انتخاب نقطه مرجع- با توجه به شکل زیر نقطه مرجع در فاصله  $L_1$  روبه‌روی وسیله تا مسیر تعریف می‌شود.

فرمان شتاب جانبی- فرمان شتاب جانبی به صورت رابطه (9) تعیین می‌شود. شکل 5 هندسه هدایت وسیله زیرآبی و نقاط مرجع را نشان می‌دهد.

$$a_{s_{cmd}} = 2 \frac{V^2}{L_1} \sin \eta \quad (9)$$

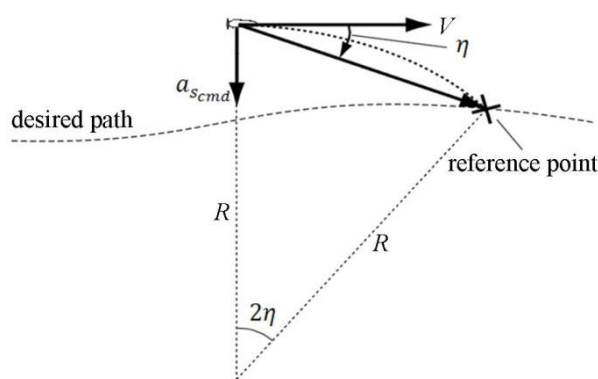


Fig. 5 Guidance geometry

شکل 5 هندسه هدایت

اندازه‌گیری اکو و  $\theta$  جهت چرخش خط اثر شناور است.

پ- آپدیت وزن‌های اجزاء براساس اطلاعات اندازه‌گیری شده به صورت روابط (7,6) است.

$$w_{x,t}^i = w_{x,t-1}^i p(M|x_d) \quad (6)$$

$$w_{y,t}^i = w_{y,t-1}^i p(M|y_d) \quad (7)$$

پ-4- نمونه‌برداری مجدد اجزاء: اجزا با وزن‌های کوچک حذف می‌شوند.  
پ-5- گام‌های پیش‌بینی، آپدیت و نمونه‌برداری مجدد در هر اکو در حلقه روند فیلتر پارتیکل انجام می‌شود. حسگر خط اثر شناور هر 12 ثانیه نواحی مورد تابش را جستجو می‌کند. در هر تابش مکان و جهت چرخش خط اثر شناور تعیین می‌شوند.

دینامیک هدف به صورت رابطه (8) در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{aligned} X_t^i &= AX_{t-1}^i + Bu + R \\ X_t^i &= [x_t^i, y_t^i] \\ A &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} T \cos \theta_{t-1} \\ T \sin \theta_{t-1} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

در آن  $u$  سرعت هدف،  $R$  اختلال فرآیند و  $T$  دوره زمانی تابش حسگر است. موقعیت هدف در هر سیکل با میانگین  $x_t^i$  و  $y_t^i$  ها برابر است.

شکل 4 الگوریتم ردگیری با فیلتر پارتیکل را نشان می‌دهد.

#### 4- هدایت

##### 1-1- بیان مسئله

دو نظر برای حل مسئله تعقیب مسیر وجود دارد. در یک روش هدایت و کنترل به صورت حلقه خارجی هدایت و حلقه داخلی کنترل جدا می‌شوند که حلقه داخلی وسیله را برای دنبال کردن فرمان‌های شتاب که توسط حلقه خارجی تولید می‌شود، کنترل می‌کند و روش‌های ساده براساس مشخصات هندسی و سینماتیکی معمولاً در حلقه خارجی هدایت استفاده می‌شوند. روش جاگزین روشی جامع است که در آن حلقه‌های داخلی و خارجی هم‌زمان طراحی شده و در آن می‌توان از روش‌های کنترلی نوین استفاده کرد.

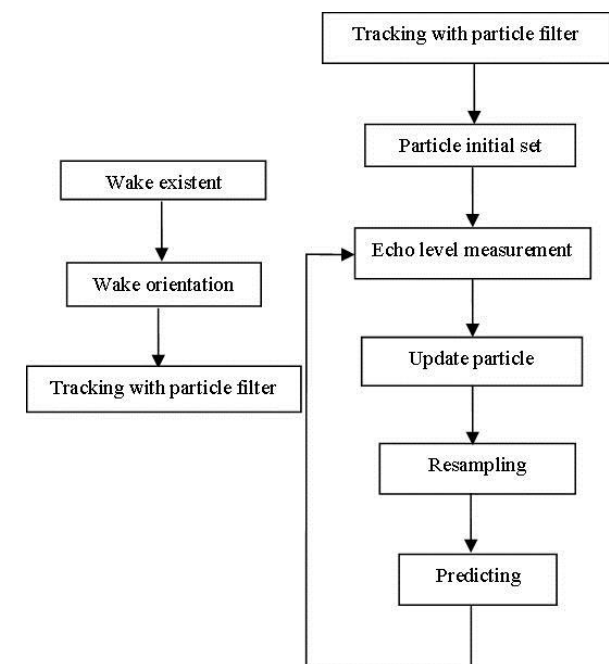


Fig. 4 Tracking algorithm

شکل 4 الگوریتم ردگیری

فرمان شتاب جانبی در منطق هدایت تعقیب مسیر می‌تواند به صورت رابطه (11) بیان شود.

$$a_{\perp LOS} = N' V_c \dot{\lambda} \quad (11)$$

که برای فرمان شتاب عمود بر خط دید در ناوبری تناسبی با ثابت ناوبری  $N' = 2$ ، با فرض نقطه مرجع ثابت در محاسبه نرخ خط دید و سرعت رسیدن است.

رابطه (11) توسط شکل 8 قابل نمایش است، که ابتدا اختلاف زاویه‌های بین شتاب جانبی وسیله ( $a_s$ ) و شتاب عمود بر خط دید ( $a_{\perp LOS}$ ) به صورت رابطه (12) نشان داده شده است.

$$a_{\perp LOS} = a_s \cos \eta \quad (12)$$

با استفاده از رابطه فرمان شتاب به صورت رابطه (13) داریم.

$$a_s = 2 \frac{V^2}{L_1} \sin \eta \quad (13)$$

بنابراین رابطه (14) به صورت زیر است.

$$a_{\perp LOS} = 2 \frac{V^2}{L_1} \sin \eta \cdot \cos \eta = 2(V \cos \eta) \left( \frac{V}{L_1} \sin \eta \right) \quad (14)$$

به طوری که با فرض نقطه هدف ثابت، پراتنز اول رابطه (14)، سرعت نزدیک شدن (بخش سرعت وابسته به جهت خط دید) و پراتنز دوم نرخ خط دید است؛ بنابراین می‌توان رابطه (15) را نوشت.

$$a_{\perp LOS} = 2 \cdot V_c \cdot \dot{\lambda} \quad (15)$$

به شکل رابطه ناوبری تناسبی با ثابت ناوبری برابر 2 است. به هر حال منطق هدایت (انتخاب نقطه مرجع و فرمان شتاب) قابل توضیح با ناوبری تناسبی نیست چرا که نقطه مرجع در حال حرکت بوده و سرعت نزدیک شدن نقطه مرجع و وسیله (با  $L_1$  ثابت) همواره صفر است.

### 3-2-4- تحلیل خطی روش هدایت پیشنهادی در مسیر مستقیم

شکل 9 برای خطی‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد.  $L_1$  فاصله بین وسیله و نقطه مرجع،  $d$  خطای تعقیب و  $V$  سرعت نامی وسیله است. با فرض کوچک رابطه (16) را داریم.

$$\sin \eta \approx \eta = \eta_1 + \eta_2 \quad (16)$$

$$\eta_1 \approx \frac{d}{L_1}, \quad \eta_2 \approx \frac{\dot{d}}{V}$$

با ترکیب روابط بالا با رابطه هدایت، رابطه (17) را داریم.

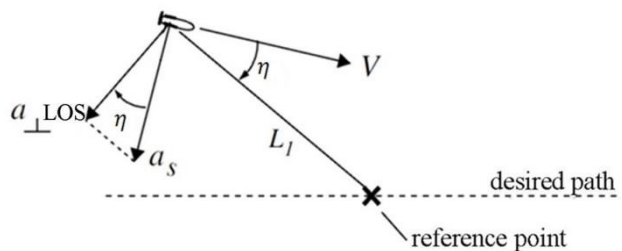


Fig. 8 Relation with Proportional Navigation

شکل 8 ارتباط با ناوبری تناسبی

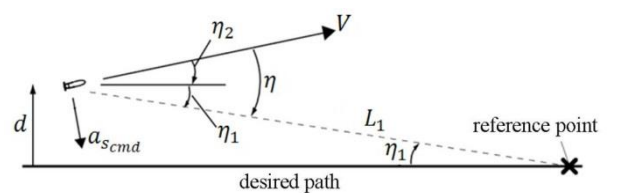


Fig. 9 Linear model for tracking straight line

شکل 9 مدل خطی تعقیب مسیر مستقیم

دو پارامتر برای معادله هدایت ضروری است.

1- جهت شتاب که بستگی به علامت زاویه بین  $L_1$  و بردار سرعت وسیله دارد.

2- در هر نقطه از زمان یک مسیر دایروی توسط مکان نقطه مرجع، مکان وسیله و بردار سرعت مماسی وسیله قابل تعریف می‌شود که در شکل 3 به صورت خط نقطه‌چین نشان داده شده است. فرمان شتاب تولیدی توسط رابطه (9) برای شتاب جانب مرکز در تعقیب بخش دایروی به صورت رابطه (10) قابل بیان است.

$$L_1 = 2R \sin \eta$$

$$\frac{V^2}{R} = 2 \frac{V^2}{L_1} \sin \eta = a_{s cmd} \quad (10)$$

### 1-2-4- مشخصات منطق هدایت

در این قسمت یک شبیه‌سازی زمان گسسته برای درک بیشتر قانون غیرخطی هدایت انجام می‌شود. ابتدا با توجه به شکل 6 فرآیند منطق هدایت در یک بازه کوچکی از زمان در نظر گرفته می‌شود. در این شماتیک نقطه مرجع در سمت راست جهت سرعت وسیله قرار دارد. بنابراین در بازه زمانی بعدی جهت سرعت به صورت ساعتگرد به فرمان شتاب اعمال می‌شود.

با استفاده از شماتیک یک بازه زمانی در شکل 6، شکل 7 مسیر وسیله برای چند بازه زمانی را نشان می‌دهد، جایی که وسیله شروع به حرکت از نقطه‌ای دور از مسیر مورد انتظار کرده است و سرانجام به مسیر مورد انتظار همگرا می‌شود.

### 2-2-4- ارتباط با قوانین هدایت ناوبری تناسبی

با فرض نقطه مرجع به عنوان هدف و وسیله به عنوان موشک، شباهت جالبی در ارتباط با هدایت ناوبری تناسبی موشک یافت می‌شود. رابطه (9) برای

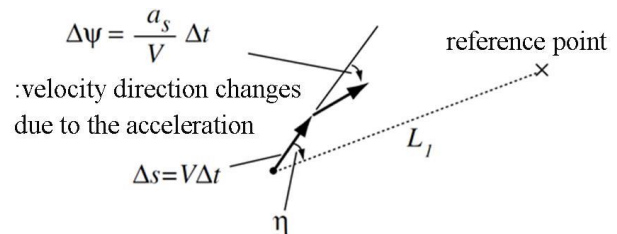


Fig. 6 Discrete show: One Time Step

شکل 6 نمایش گسسته: یک بازه زمانی

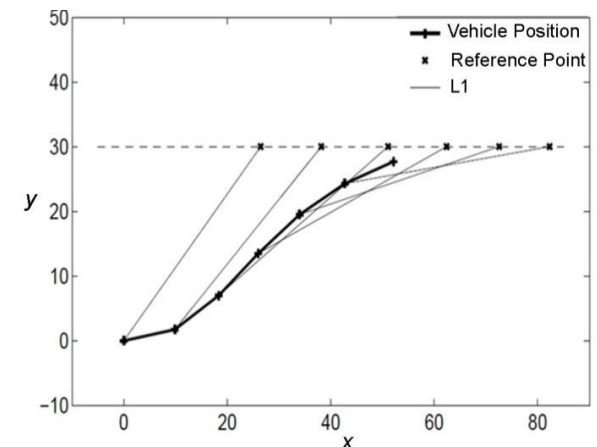


Fig. 7 Discrete simulation ( $\Delta t = 1 \text{ s}, V = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}, L_1 = 40 \text{ m}$ )

شکل 7 شبیه‌سازی زمان گسسته ( $\Delta t = 1 \text{ s}, V = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}, L_1 = 40 \text{ m}$ )

## 4-2-4- مقایسه منطق هدایت پیشنهادی با روش خطی

در بخش پیشین منطق هدایت غیرخطی در تعقیب خط راست با تقریبی به صورت یک کنترلر خطی مشتقی-تناسبی روی خطای تعقیب نمایش داده شد. این بخش با استفاده از شبیه‌سازی، منطق هدایت غیرخطی را با کنترلر خطی مرتبط مقایسه می‌کند.

در تحلیل شبیه‌سازی که در شکل 10 آمده است، سرعت نامی وسیله 25 متر بر ثانیه، فاصله  $L_1$ ، 150 متر و در ابتدا از خط راست 10 متر فاصله دارد. کنترلر خطی رابطه (17) استفاده شده است.

## 5- شبیه‌سازی

برای اعتبارسنجی روش‌های ارائه شده در مقاله از شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب استفاده می‌شود. همان‌طور که در بخش‌های پیشین مقاله بیان شد، نقاط مسیر خط اثر شناور توسط فیلتر پارتیکل به‌صورت گسسته در زمان‌های ارسال حسگر صوتی تخمین زده شده و به گونه‌ای نقاط مرجع جهت استفاده در الگوریتم هدایت غیرخطی استخراج می‌شود. در این سناریو هدف با سرعت ثابت از نقطه  $x=2150$  و  $y=500$  با زاویه 45 درجه در جهت کاهش  $x$  و افزایش  $y$ ، پس از آن به صورت مستقیم در جهت کاهش  $x$  و سپس در جهت کاهش  $x$  و  $y$  حرکت می‌نماید. وسیله زیرآبی نیز که پس از پرتاب از یک پلت فرم اولیه با یک تخمین اولیه توسط آن به سمت خط اثر شناور هدف حرکت کرده است از نقطه با مختصات  $x=2450$  و  $y=500$  وارد فاز هدایت خط اثر شناور خود می‌شود. شکل 11 تعقیب هدف را توسط وسیله نشان داده است.

شکل 11 تعقیب مسیر مورد انتظار بالا را در نقاط تخمین‌زده‌شده توسط فیلتر پارتیکل توسط هدایت غیرخطی پیشنهادی را نشان می‌دهد. فرآیند پیشنهادی با استفاده از الگوریتم فیلتر پارتیکل مسیر و جهت خط اثر شناور هدف را مشخص کرده و در هر تابش حسگر، نقطه‌ای را روی خط اثر شناور هدف در نظر می‌گیرد. این نقطه در هر پریود تابشی به عنوان نقطه مرجع برای استفاده در هدایت غیرخطی تعیین می‌شود. توضیح این‌که با توجه به محیط آب، اختلال اندازه‌گیری گوسی به مقدار 20 دسی‌بل و با انحراف معیار 6 دسی‌بل در رابطه (3) است و همچنین به سطح اکوی دریافتی هر بخش حسگر مقداری به صورت تصادفی و در بازه  $[-15, 15]$  اضافه شده است.

خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، میزان خطای بین دو مجموعه داده را اندازه‌گیری می‌کند. در این مقاله از این پارامتر برای مقایسه مقادیر  $x$  و  $y$  تخمین‌زده‌شده هدف توسط فیلتر پارتیکل با مقادیر واقعی مختصات هدف استفاده شده و تعریف این خطا در حالت زمان گسسته به صورت رابطه (28) است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (28)$$

که در آن  $x_i$  مقدار واقعی و  $\hat{x}_i$  مقدار تخمین‌زده‌شده است.

مقدار RMSE مختصات  $x$  و  $y$  نقاط تخمین‌زده شده و موقعیت شناور هدف در شکل‌های 12، 13 به‌دست‌آمده است.

با توجه به شکل 11 روش هدایت پیشنهادی توانسته به خوبی نقاط مرجع تخمینی توسط فیلتر پارتیکل را که بیانگر مختصات هدف هستند، تعقیب کند. با توجه به مقادیر RMSE شکل‌های 12 و 13 می‌توان روش تخمین نقاط مرجع به‌دست‌آمده را اعتبارسنجی کرد.

## 6- نتیجه‌گیری

در این مقاله پس از توضیح مختصری راجع به خط اثر شناور مدلی برای خط

$$a_{s_{cmd}} = 2 \frac{V^2}{L_1} \sin \eta \approx 2 \frac{V}{L_1} \left( \dot{d} + \frac{V}{L_1} d \right) \left( \dot{d} + \frac{V}{L_1} d \right) \quad (17)$$

خطی‌سازی منطق غیرخطی به کنترل‌کننده PD برای خطای تعقیب منجر می‌شود، همچنین نسبت سرعت وسیله به فاصله  $L_1$  یک فاکتور مهم برای تعیین بهره‌های تناسبی و مشتقی کنترل‌کننده است. برای نمونه یک مقدار کوچک برای  $L_1$  به بهره بالای کنترل منجر می‌شود و نسبت  $\frac{L_1}{V}$  ثابت زمانی کنترل‌کننده PD را تعیین می‌کند.

فاصله  $L_1$  را می‌توان با استفاده از تحلیل پایداری به همراه مدل خطی پلنت و کنترلر خطی استخراج کرد. مدل پلنت باید شامل دینامیک وسیله با کنترلر زاویه حلقه داخلی و دینامیک همه حسگرها در تابع تبدیل باشد.

علاوه‌بر این با فرض نبود دینامیک حلقه داخلی و زاویه کوچک  $\eta_2$ ، در نتیجه  $\ddot{d} \approx -\ddot{d}$  و رابطه (11) به صورت رابطه (18) می‌شود.

$$\ddot{d} + 2\xi\omega_n\dot{d} + \omega_n^2 d = 0, \xi = 1/\sqrt{2}, \omega_n = \sqrt{2}V/L_1 \quad (18)$$

رابطه (12) یک معادله خطی تقریبی برای موضوع تعقیب مسیر مستقیم نشان می‌دهد که یک سیستم درجه دوم ساده و همیشه دارای ضریب میرایی 0.707 است و فرکانس طبیعی توسط نسبت سرعت و فاصله تا نقطه مرجع تعیین می‌شود.

با استفاده از تحلیل پایداری لیاپانوف غیرخطی براساس شکل 9 به صورت (19) داریم.

$$\dot{d} = V \sin \eta_2 \quad \text{و} \quad \eta_2 = -\frac{a_s}{V} \quad (19)$$

با توجه به رابطه (13) و برای وجود نقطه مرجع منحصر به فرد با فرض رابطه (20) است.

$$d < L_1, \quad -\frac{\pi}{2} < \eta < \frac{\pi}{2} \quad (20)$$

با تعریف تابع لیاپانوف به صورت رابطه (21) است.

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} (V \sin \eta_2)^2 + \int_0^d \frac{2V^2}{L_1} \sin(\eta - \eta_2) dy \quad (21)$$

با استفاده از شکل 9 رابطه (22) را داریم.

$$\sin(\eta - \eta_2) = \frac{d}{L_1} \quad (22)$$

بنابراین رابطه (23) به صورت زیر است.

$$\dot{\mathcal{L}} = \frac{1}{2} V^2 \sin^2 \eta_2 + \frac{V^2}{L_1^2} d^2 \quad (23)$$

که یک تابع مثبت معین است. با مشتق‌گیری زمان از رابطه (21) رابطه (24) را داریم.

$$\dot{\mathcal{L}} = V^2 \sin \eta_2 \cos \eta_2 \dot{\eta}_2 + \frac{V^2}{L_1^2} d \dot{d} \quad (24)$$

از روابط (19, 22, 24) رابطه (25) را داریم.

$$\dot{\mathcal{L}} = -\frac{2V^3}{L_1} \sin \eta_2 \{ \cos \eta_2 \sin \eta - \sin(\eta - \eta_2) \} \quad (25)$$

در آخر با استفاده از رابطه (26)

$$\sin(\eta - \eta_2) = \cos \eta_2 \sin \eta - \cos \eta \sin \eta_2 \quad (26)$$

تابع لیاپانوف به‌صورت رابطه (27) می‌شود.

$$\dot{\mathcal{L}} = -\frac{2V^3}{L_1} \sin^2 \eta_2 \cos \eta \quad (27)$$

که به ازای  $|\eta| < \pi/2$ ، یک تابع منفی نیمه معین است. با توجه به قضیه مجموعه ثابت،  $\dot{\mathcal{L}} = 0$  مسیر  $(\eta_2 = 0, d = 0)$  را نتیجه می‌دهد، بنابراین برای  $(\eta_2 = 0, d = 0)$ ،  $d < L_1$ ،  $|\eta| < \pi/2$  پایدار مجانبی است.



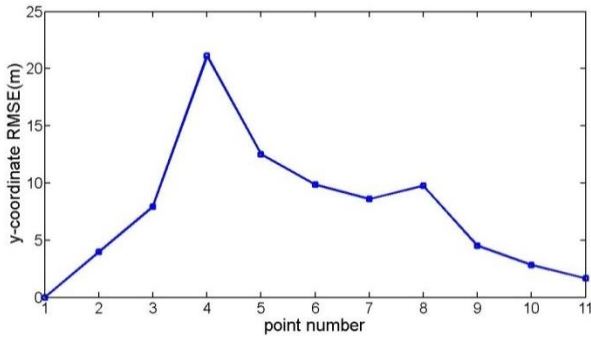


Fig. 13 Y-coordinate RMSE of estimated target points  
 شکل 13 مقدار RMSE مختصات y تخمین‌زده‌شده نقاط هدف

پرداخته شد. در ادامه روشی با استفاده از فیلتر پارتیکل، خط اثر شناور و جهت آن را برای تولید نقاطی از مختصات هدف در فاصله‌های تابش حسگر پیشنهاد شد. سپس یک روش هدایت غیرخطی معرفی شده و با استفاده از تخمین با فیلتر پارتیکل به عنوان نقاط مرجع در هدایت غیرخطی پیشنهادی در شبیه‌سازی متلب مورد استفاده قرار گرفته و می‌توان عملکرد الگوریتم تخمین را با استفاده از تحلیل مقادیر RMSE در شکل‌های 12 و 13 مطلوب دانست. با توجه به شکل 11 تعقیب نقاط مرجع توسط هدایت غیرخطی اعتبارسنجی شده است. با توجه به استفاده از روش تخمین نقاط مرجع و همچنین هدایت غیرخطی پیشنهادی و مقایسه نتایج مقاله با کارهای مشابه (که به صورت جداگانه در حوزه تخمین توسط فیلترها و همچنین در حوزه آرایش حسگرها در متن مقاله به همراه مراجع آن‌ها مورد بررسی قرار گرفتند)، می‌توان حرکت روانتر و بدون زیگزاک وسیله زیرآبی به سمت هدف را از نتایج مهم مقاله برشمرد.

7- مراجع

- [1] A. E. Gamal, Performance and stability of an autonomous underwater vehicle guidance and control, *Proceedings of International Conference on Modelling, Identification & Control (ICMIC)*, pp. 67-73, 2013.
- [2] Y. H. Lee, B. H. Ku, S. M. Chung, W. Y. Hong, H. S. Ko, Robust search method for shipwake using two wake sensors, *Acoustical Society of Korea*, Vol. 29, No. 3, pp.155-164, 2010.
- [3] Z. Xiang-tao, S. Xu-wen, Z. Ming, Simulation of trajectory logic for wake homing torpedo, *Torpedo Technology*, China, 2009.
- [4] I. Karoui, I. Quidu, M. Legris, Automatic sea-surface obstacle detection and tracking in forward-looking sonar image sequences, *Geoscience and Remote Sensing IEEE Transactions*, Vol. 53, No. 8, pp. 4661-4669, 2015.
- [5] H. Fu, P. Wan, Numerical simulation on ship bubbly wake, *Harbin Engineering University and Springer-Verlag Berlin*, Heidelberg, 2011.
- [6] P. Xun, Z. Jing-yuan, Z. Jiang, Simulation and optimization of homing strategy for acoustic wake guide torpedo, *Journal of Naval University of Engineering*, Vol. 24, No. 3, pp. 98-102, China, 2012.
- [7] K. W. Lo, B. G. Ferguson, Automatic detection and tracking of a small surface watercraft in shallow water using a high frequency active sonar, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 40, No. 4, pp. 1377-1388, October, 2004.
- [8] H. Ohlsson, M. Verhaegen, S. Shankar Sastry, Nonlinear compressive particle filtering, *Decision and Control (CDC) 2013 IEEE 52nd Annual Conference*, pp. 7054-7059, USA, December, 2013.
- [9] T. Keviczky, J. Balas, Software enabled flight control using receding horizon techniques, *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, (AIAA2003-5671), Texas, August, 2003.
- [10] D. J. Yost, J. E. Kain, Command to line-of-sight guidance: A stochastic optimal control problem, *Spacecraft*, Vol. 14, No. 7, pp. 438-444, 1977.
- [11] P. Zarchan, *Tactical and Strategic Missile Guidance*, third edition, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1997.
- [12] J. H. Blakelock, *Automatic Control of Aircraft and Missiles*, second edition, Wiley- Interscience, 1991.

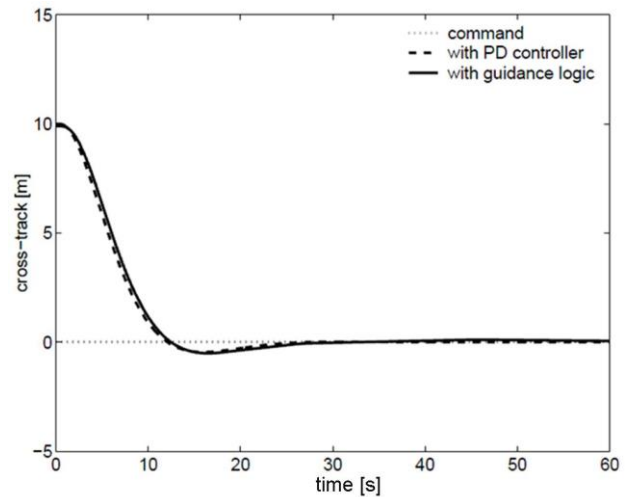


Fig. 10 Tracking straight path

شکل 10 تعقیب مسیر مستقیم

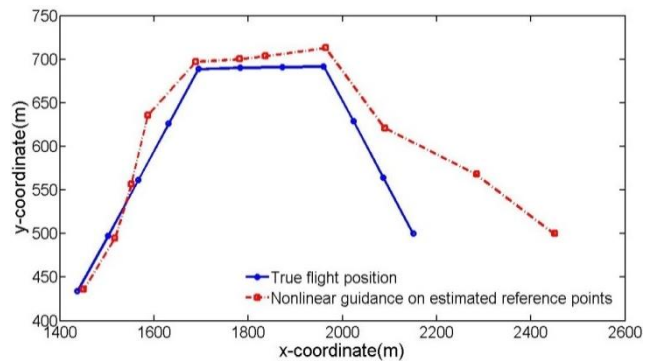


Fig. 11 Tracking desired path with recommended nonlinear guidance on estimated reference points

شکل 11 تعقیب مسیر مورد انتظار توسط هدایت غیرخطی پیشنهادی در نقاط مرجع تخمین‌زده‌شده

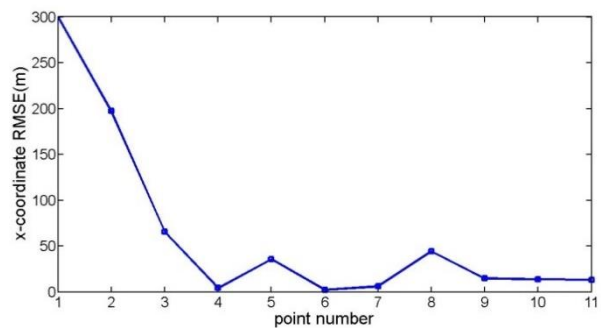


Fig. 12 X-coordinate RMSE of estimated target points

شکل 12 مقدار RMSE مختصات x تخمین‌زده‌شده نقاط هدف

اثر شناور معرفی شده و پس از آن آرایش سه حسگری جهت کشف و شناسایی خط اثر شناور با توجه به محاسن آن که شامل امکان استفاده از حسگرهای موجود و عدم نیاز به بازطراحی سیستم حسگری، تعیین جهت خط اثر شناور با توجه به تأخیر زمانی در تشخیص حسگرهای جانبی، تشخیص به صورت پیش‌بین به دلیل وجود زاویه حسگرهای جانبی نسبت به محور سمت وسیله زیرآبی و تأیید خط اثر شناور توسط حسگر میانی است،