

بررسی عملکرد دو روش تطبیقی افزایش سطح نویز و تخمین ورودی در ردیابی اهداف مانوردار

علیرضا یزدانی^۱، علیرضا الفی^۲

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی برق - کنترل، دانشکده برق و رباتیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

^۲ دانشیار، دانشکده برق و رباتیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

چکیده

در این مقاله دو روش تطبیقی افزایش سطح نویز فرآیند و آشکارسازی و تخمین ورودی بر مبنای صافی کالمن در مساله آشکارسازی مانور هدف معرفی و مقایسه می‌شوند. ابتدا در روش افزایش سطح نویز، تاثیر انتخاب مشخصه تصمیم‌گیری میانگین متحرک و میانگین کاهش‌یافته نمایی در بحث آشکارسازی مانور بررسی می‌شود که شبیه‌سازی نشان می‌دهد استفاده از مشخصه تصمیم‌گیری میانگین متحرک، باعث افزایش سرعت صافی در آشکارسازی مانور و در نتیجه ردیابی بهتر می‌شود. در مرحله بعد روش افزایش سطح نویز با مشخصه تصمیم‌گیری میانگین متحرک، با روش تخمین ورودی مقایسه می‌شود که نتایج نشان می‌دهند روش تخمین ورودی در مجموع عملکرد بهتری نسبت به روش افزایش سطح نویز دارد ولی حجم محاسبات این روش نسبت به روش افزایش سطح نویز بسیار بالاتر است.

کلمات کلیدی: آشکارسازی مانور، صافی کالمن، تخمین ورودی

۱- مقدمه

مساله ردیابی اهداف متحرک که کاربردهای نظامی و غیرنظامی فراوانی دارد، مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. در بحث ردیابی عموماً فرض می‌شود که هدف با سرعت ثابت در حال حرکت است و امکان مانور هدف و ناظر وجود دارد (بدیهی است موقعیت و سرعت ناظر معلوم فرض می‌شوند). هدف از ردیابی اهداف مانوردار تخمین موقعیت و سرعت هدف است که مهم‌ترین چالش آن، تشخیص زمان مانور هدف می‌باشد. در واقع در صورت انجام مانور و عدم تشخیص آن توسط ناظر، خطای ردیابی زیاد شده و امکان از دست‌دادن ردیابی وجود دارد. در تاریخچه گسترش روش‌های ردیابی اهداف مانوردار^۱ (MTT)، در ابتدا روش تک‌مدله بر مبنای صافی کالمن تطبیق‌یافته پیشنهاد گردید. سپس روش‌های مبتنی بر تصمیم‌گیری ارائه شد. اخیراً نیز عملکرد روش‌های فلیترینگ غیرخطی مانند الگوریتم‌های مبتنی بر نمونه‌برداری مطالعه شده است [1]. روش‌های مبتنی بر تصمیم‌گیری جهت ردیابی اهداف مانوردار که تاکنون گسترش پیدا کرده اند به سه کلاس نویز معادل، تخمین و آشکارسازی ورودی^۲ و روش‌های گزینش مدل دسته‌بندی می‌شوند. روش‌های مختلف آشکارسازی زمان شروع مانور، از جمله روش‌های مبتنی بر مانده‌های اندازه‌گیری و تخمین ورودی را می‌توانید در [2] بیابید. همچنین در [3] آشکارسازی مانور با استفاده از روش احتمال مورد انتظار^۳ بر روی یک مدل سرعت ثابت انجام شده است. در [4] نیز اثرات مانور به صورت ورودی شتابی مدل شده و از تخمین آن جهت آشکارسازی مانور استفاده شده است. در [5] نیز ارزیابی عملکرد چندین الگوریتم جهت ردیابی اهداف غیرفعال زیردریایی از جمله تخمین گر شبه خطی، تخمین گر بیشترین احتمال، صافی کالمن توسعه‌یافته با بهره‌ی اصلاح شده و صافی ذره‌ای مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بیشتر آشکارسازها در بحث ردیابی اهداف مانوردار به نوعی بر مبنای آزمون خی-دو^۴ هستند لذا در این مقاله ابتدا دو روش آشکارسازی بر مبنای آزمون خی-دو بررسی می‌شوند. سپس به ترتیب توضیح مختصری از روش‌های نویز معادل و آشکارسازی ورودی ارائه می‌شود. در ادامه شبیه‌سازی مبتنی بر [6] و در انتها نتیجه‌گیری آورده می‌شود.

۲- روش آزمون خی-دو

بیشتر آشکارسازها در بحث ردیابی مانوردار به نوعی بر مبنای آزمون خی-دو هستند. آنها از مشخصه آماری استفاده می‌کنند که به طور کامل یا تقریباً دارای توزیع خی-دو هستند. فرض کنید ϵ (تقریباً) دارای توزیع خی-دو با n درجه آزادی است (به این معنی که $\chi_n^2 \sim \epsilon$) سپس آشکارساز بر مبنای آزمون خی-دو آشکارسازی مانور را اعلام می‌کند اگر:

^۱ علیرضا یزدانی: yazdani_2004@yahoo.com

^۲ Maneuvering Target Tracking

^۳ Input Detection and Estimation

^۴ Expected Likelihood

^۵ Chi-Square Test Based

$$\varepsilon > \lambda = \chi_n^2(\alpha) \quad (2.1)$$

که در آن $1 - \alpha$ سطح اعتماد است. واضح است که $\|y - \bar{y}\|_{\Sigma^{-1}}^2 = (y - \bar{y})\Sigma^{-1}(y - \bar{y})$ به ازای هر بردار تصادفی n بعدی با مشخصه $y \sim N(\bar{y}, \Sigma)$ دارای توزیع χ_n^2 دو است. در بحث آشکارسازی مانور دو انتخاب معمول برای y مانده های اندازه گیری Z و تخمین ورودی u هستند.

۲-۱- آزمون بر مبنای مانده

در این حالت مجذور نرمالیز شده مانده ها یعنی $\varepsilon_k = \tilde{z}_k^T S_k^{-1} \tilde{z}_k$ استفاده می شود، که در آن $\tilde{z}_k = z_k - \hat{z}_{k/k-1}$ مانده های اندازه گیری و $S_k = \text{cov}(\tilde{z}_k)$ میانگین متحرک^۱ (ε_k^s) بر روی یک پنجره لغزشی $[k - s + 1, k]$ به همراه جمع محوکننده حافظه^۲ (ε_k^p) از روابط زیر بدست می آیند.

$$\varepsilon_k^s = \sum_{j=k-s+1}^k \varepsilon_j, \quad \varepsilon_k^p = \sum_{j=1}^k \rho^{k-j} \varepsilon_j = \rho \varepsilon_{k-1}^p + \varepsilon_k, \quad 0 < \rho < 1, \quad s_\rho = \frac{1}{1-\rho}$$

که در آن S_ρ طول موثر پنجره محو کننده حافظه است. با در نظر گرفتن فرض گوسی- خطی، اجزای مانده $\langle z_k \rangle$ دارای توزیع گوسی و سفید با میانگین صفر هستند. در نتیجه ε_k و ε_k^s دارای توزیع χ^2 دو به ترتیب با درجه آزادی های n_z و sn_z می باشند (یعنی $\varepsilon_k \sim \chi_{n_z}^2$ ، $\varepsilon_k^s \sim \chi_{sn_z}^2$) که در آن $n_z = \dim(z)$ است. چون حاصل جمع وزن دار شده مانده ها می باشد، دارای توزیع χ^2 دو نیست ولی با تقریبی می توان آن را به عنوان نسخه مقیاس بندی شده توزیع χ^2 دو در نظر گرفت. نهایتاً از رابطه (۲.۱) می توان جهت تشخیص زمان شروع مانور استفاده کرد که در آن ε مساوی با ε_k ، ε_k^s و یا ε_k^p می باشد.

۲-۲- آزمون بر مبنای تخمین ورودی (IE)

اگر هدف مانور نکند، ورودی کنترل آن (به عنوان مثال شتاب و یا افزایش آن) صفر است و لذا هر تخمین از ورودی که از مانده های اندازه گیری با فرض گوسی- خطی بدست می آید، دارای میانگین صفر و گوسی است. در نتیجه $\varepsilon = u^T \Sigma^{-1} u$ دارای توزیع χ^2 دو ($\chi_{n_u}^2$) بوده که در آن $n_u = \dim(u)$ و $\Sigma = \text{cov}(\hat{u})$ می باشد. در نتیجه رابطه (۲.۱) جهت آشکارسازی زمان مانور می تواند استفاده شود. در واقع اثر مانور به صورت ورودی u مدل شده و در طول مانور ثابت فرض می شود همچنین مقدار آن نیز از مانده های اندازه گیری از روش حداقل مربعات به دست می آید. اساساً به خاطر سادگی، آزمون χ^2 دو بر مبنای تخمین ورودی در خیلی از الگوریتم های مبتنی بر تخمین ورودی [7-8] استفاده شده است. این روش نیز به صورت میانگین متحرک و یا میانگین کاهش یافته نمایشی می تواند استفاده شود که در آن $\varepsilon_k = u_k^T \Sigma^{-1} u_k$ می باشد.

۳- روش نوین معادل

تقریباً تمامی انواع حرکت هدف با مدل فضای حالت زیر قابل توصیف است [1]:

$$x_{k+1} = f_k(x_k, u_k, w_k) \quad (3.1)$$

که در آن x متغیر حالت، u ورودی کنترل و w نویز فرآیند است. در روش نوین معادل، فرض بر این است که اثر مانور به وسیله (بخشی از) نویز سفید و یا رنگی فرآیند به خوبی مدل شود.

۳-۱- انتخاب چند سطح مختلف جهت نویز فرآیند

از روش هایی که می شود آنرا زیرمجموعه روش نوین معادل محسوب کرد، در نظر گرفتن چند سطح برای نویز فرآیند و بکارگیری قانونی برای سوئیچ کردن بین سطوح می باشد. روش کار بدین صورت است که در شرایط نرمال، صافی با یک مقدار پایین نویز فرآیند Q_1 شروع بکار کرده و همزمان با آن مجذور نرمالیز شده مانده ها یعنی ε_k تحت بررسی قرار می گیرد. چنانچه این مقدار از آستانه مشخصی بیشتر باشد، صافی مقدار بالاتر نویز فرآیند Q_2 را انتخاب می کند که با این روش خطای ردیابی کم می شود.

۴- روش تخمین ورودی

فرض کنید دینامیک هدف مانوردار توسط رابطه (۳.۱) مدل شده باشد. ایده اصلی این است که ورودی کنترل u_k صریحاً تخمین زده شود و سپس برای اصلاح حالت ها از این ورودی $\hat{u}_k$ تخمین زده شده استفاده گردد. در حالت کلی، در هنگام مانور هدف $u_k \neq 0$ و عدم مانور هدف $u_k = 0$ فرض می شوند. جزئیات بیشتر در رابطه با روش تخمین ورودی را می توانید در [6] و [9] بیابید.

^۱Moving Average
^۲Fading-Memory Average

۵- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش یک مساله از [6] انتخاب شده است که در آن موقعیت هدف هر ۱۰ ثانیه نمونه‌برداری می‌شود. همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است در ابتدا هدف با سرعت و جهت ثابت حرکت می‌کند در لحظه نمونه‌برداری ۴۰ ام شروع به یک چرخش آهسته ۹۰ درجه می‌کند که بعد از ۲۰ دوره نمونه‌برداری به اتمام می‌رسد. چرخش ۹۰ درجه دوم که سریع انجام می‌شود در لحظه نمونه‌برداری ۶۱ ام شروع شده و پس از ۵ دوره نمونه‌برداری کامل می‌شود. شرایط اولیه هدف با بردار حالت $x = [x \ \dot{x} \ y \ \dot{y}]'$ برابر $x(0) = [2000 \ 0 \ 10000 \ -15]'$ می‌باشد که در آن موقعیت برحسب متر و سرعت برحسب متر بر ثانیه می‌باشد.

$$u_x = u_y = 0.075m/s^2 \quad 400s \leq t \leq 600s$$

چرخش آهسته در نتیجه ورودی‌های شتابی

$$u_x = u_y = -0.3m/s^2 \quad 610s \leq t \leq 660s$$

و چرخش سریع دارای شتاب‌های

می‌باشد. مقادیر موقعیت بر اساس معادله زیر اندازه‌گیری می‌شوند که در آن $v(k)$ نویز اندازه‌گیری است که سفید، مستقل از نویز فرآیند، با میانگین صفر و واریانس 10^4 متر مربع در نظر گرفته می‌شود.

$$z(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} x(k) + v(k)$$

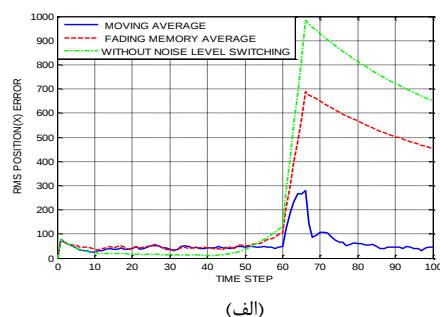
مساله فوق از دو جنبه مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا روش نویز معادل (انتخاب سطح نویز بالاتر در مواقع مانور) با استفاده از دو مشخصه تصمیم‌گیری میانگین متحرک و میانگین کاهش‌یافته نمایی مورد استفاده قرار گرفته و با حالتی که سطح نویز ثابت است مقایسه می‌شود. سپس بهترین معیار انتخاب شده و با روش تخمین ورودی مقایسه می‌شود. الگوریتم تطبیقی بر اساس نویز فرآیند سفید و سوئیچ به سطح نویز بالاتر در مواقع مانور از معادله حالت زیر استفاده می‌کند.

$$x(k+1) = Fx(k) + \Gamma w(k), \quad F = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \Gamma = \begin{bmatrix} \frac{T}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{T}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

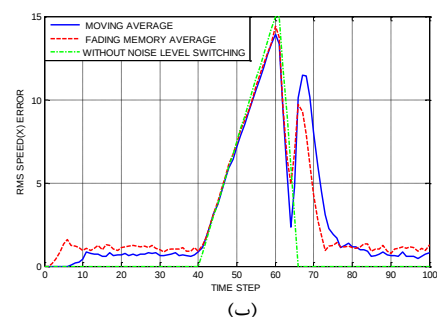


شکل ۱: مسیر واقعی حرکت هدف

که در آن $w(k)$ نویز فرآیند با میانگین صفر و واریانس q است که در واقع معرف افزایش سرعت در طول دوره نمونه‌برداری است. در این مساله در مواقعی که مانور انجام نمی‌شود مقدار آن برابر صفر و در مواقع مانور ۱۰ در نظر گرفته می‌شود. شبیه‌سازی برای ۵۰ اجرا با میزان آستانه $7/38$ برای سه حالت میانگین متحرک با طول پنجره ۵، میانگین کاهش‌یافته نمایی با طول موثر پنجره ۵ ($\rho = 0.8$) و همچنین برای حالتی که سطح نویز فرآیند ثابت است (در اینجا صفر) انجام می‌شود که نتایج در شکل ۲ آورده شده است.



(الف)

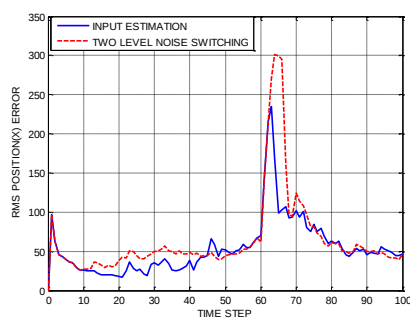


(ب)

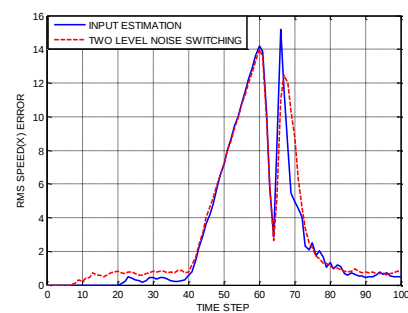
شکل ۲: (الف) مقدار موثر خطای موقعیت در راستای محور X، (ب) مقدار موثر خطای سرعت در راستای محور X

لازم به ذکر است که به دلیل مشابه بودن روند انجام کار و طولانی نشدن مبحث، فقط نتایج شبیه‌سازی در راستای محور X آورده شده است. همانطور که در شکل ۲(الف) ملاحظه می‌شود چرخش آهسته که از لحظه نمونه‌برداری ۴۰ آغاز می‌شود تاثیر چندانی روی عملکرد سه صافی در ردیابی موقعیت ندارد و هر سه صافی با خطای قابل قبولی ردیابی را انجام می‌دهند (با توجه به انحراف معیار ۱۰۰ برای نویز اندازه‌گیری خطای زیر

۱۰۰ منطقی به نظر می‌رسد) ولی از لحظه نمونه برداری ۶۰ به بعد که چرخش سریع آغاز می‌شود، عملکرد هر سه صافی با جهشی در خطا مواجه می‌شود به طوری که صافی که با سطح نویز فرآیند ثابت (صفر) کار می‌کند، دچار بیشترین خطا شده و صافی که از معیار میانگین متحرک استفاده می‌کند دارای بهترین عملکرد است به نحوی که سریعاً خود را به محدوده خطای مجاز می‌رساند. عملکرد صافی که از میانگین کاهش یافته‌نمایی استفاده می‌کند، نسبت به حالتی که مانور آشکارسازی نمی‌شود بهتر است ولی در مقایسه با روش میانگین متحرک کندتر عمل می‌کند. در رابطه با تحلیل نمودار سرعت همانگونه که در شکل ۲(ب) نشان داده شده است، وضعیت تقریباً مشابه است با این تفاوت که افزایش خطا از لحظه نمونه برداری ۴۰ که چرخش آهسته شروع می‌شود روند افزایشی پیدا کرده و در نهایت پس از کامل شدن چرخش دوم، کاهش پیدا می‌کند. در این حالت هم صافی با سطح نویز فرآیند ثابت بیشترین خطا را تجربه می‌کند در حالی که دو صافی دیگر عملکرد تقریباً مشابهی دارند با این تفاوت که صافی میانگین متحرک به خطای حالت ماندگار کمتری می‌رسد. سوالی که ممکن است مطرح شود این است که چگونه خطای صافی که از سطح نویز فرآیند صفر استفاده می‌کند قبل از لحظه ۴۰ و بعد از لحظه ۶۶ (در مواقع بدون مانور) صفر است. در واقع این بدان علت است که حرکت واقعی هدف در این لحظات با سرعت ثابت در راستای محور Y است (سرعت در راستای محور X صفر است) و نداشتن نویز فرآیند خطای تخمین را کم می‌کند ولی این امر باعث می‌شود الگوریتم تخمین اصطلاحاً به خواب برود، به همین دلیل است که در مواقع تغییر مسیر خطای زیادی را متحمل می‌شود. در بخش دوم شبیه‌سازی روش قبل با بهترین معیار یعنی میانگین متحرک با روش تخمین ورودی که توضیحات آن در بخش ۴ آورده شده است مقایسه می‌شود. همانطور که در شکل ۳(الف) ملاحظه می‌شود تا قبل از شروع چرخش سریع عملکرد دو صافی تقریباً مشابه است ولی بعد از لحظه ۶۰ روش تخمین ورودی خطای کمتری را تجربه کرده و زودتر به محدوده مجاز برمی‌گردد. عملکرد دو صافی در تخمین سرعت همانگونه که در شکل ۳(ب) نشان داده شده است تقریباً مشابه است، هر چند که خطای روش تخمین ورودی در مجموع کمتر است (غیر از یک جهش که در لحظه ۶۶ رخ می‌دهد).



(الف)



(ب)

شکل ۳: (الف) مقدار موثر خطای موقعیت در راستای محور X ، (ب) مقدار موثر خطای سرعت در راستای محور X

۶- بحث و نتیجه‌گیری

از شبیه‌سازی‌ها می‌توان مشاهده کرد که تغییر مسیر ناگهانی هدف، خطای ردیابی را افزایش داده و در صورتی که الگوریتم تخمین نتواند خود را با این شرایط تطبیق دهد، احتمال واگرایی و در نتیجه از دست دادن ردیابی وجود دارد. بررسی عملکرد روش تطبیقی افزایش سطح نویز با دو مشخصه تصمیم‌گیری میانگین متحرک و میانگین کاهش یافته‌نمایی نشان می‌دهد که روش میانگین متحرک از سرعت بالاتری برخوردار است و در مواقع تغییر مسیر هدف، منجر به ردیابی بهتر می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهند روش تخمین ورودی در مجموع عملکرد بهتری نسبت به روش افزایش سطح نویز دارد. با این حال حجم محاسبات این روش نسبت به روش افزایش سطح نویز بسیار بالاتر است در حالی که روش افزایش سطح نویز در عین سادگی نتایج قابل قبولی را به همراه دارد.

مراجع

- [1] Li, X.R. and Jilkov, V.P. (2002), A survey of maneuvering target tracking-Part IV: Decision-based methods. In *Proceedings of the 2002 SPIE Conference on Signal and Data Processing of Small Targets*, Orlando, FL, **vol. 4728**, 511–534.
- [2] Ru, J. F. Jilkov, V.P. and Bashi, A. (2009), "Detection of Target Maneuver Onset", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **vol. 45**, pp. 536-554.
- [3] Northardt, E.T. Bilik, I. and Abramovich, Y. (2014), "Bearings-only constant velocity target maneuver detection via expected likelihood", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **vol. 50**, pp. 2974-2988.

- [4] Zhang, Y. J. and Geng, Z. (2013), "Detection of Target Maneuver from Bearings-Only Measurements", *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, pp. 2028-2034.
- [5] Jawahar, A. and Vishnu, C.C. (2016), Comparative analysis of nonlinear estimation schemes used for undersea sonar application. *Innovare Journal of Engineering & Technology*, **vol. 4**, Issue 4.
- [6] Chan, Y. T. Hu, A. G. C. and Plant, A. (1979), A Kalman Filter Based Tracking Scheme with Input Estimation. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **AES-15**, 237–244
- [7] Lee, H. and Tahk, M.-J. (1999), Generalized input-estimation technique for tracking maneuvering targets. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **AES-35**, 1388–1402.
- [8] Lee, S.-C. and Liu, C.-Y. (1999), Trajectory Estimation of Reentry Vehicle by Use of on-Line Input Estimator. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, **22**, 808.
- [9] Bar-Shalom, Y. Li, X. R. and Kirubarajan, T. (2001), *Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory, Algorithms, and Software*. New York: Wiley.

Abstract

In this paper, two adaptive methods of increasing process noise level and input detection and estimation based on Kalman Filter in the target maneuver detection problem are introduced and compared. In the first step, in the noise level increasing method, the effect of the selection of the moving average and exponentially discounted average as a decision statistics in the maneuver detection problem is examined, which simulation results show that using the moving average decision statistic increases the speed of the filter in maneuver detection and as a result, good target tracking is obtained. In the next step, the method of increasing the noise level with the moving average decision statistic is compared with the input estimation method. The results show that the input estimation method has a better performance than the method of increasing the noise level, but the computation burden of this method is much higher than the noise level increasing method.

Keywords: maneuver detection, Kalman Filter, input estimation