

تخمین پارامترهای اهداف راداری مانور زیاد

حمید خالوزاده

دانشگاه فردوسی مشهد

h_khaloozadeh@um.ac.ir

علی کارساز

دانشگاه فردوسی مشهد

a_karsaz1@yahoo.com

چکیده: این مقاله ضمن مرور روشهای ارائه شده جهت تخمین پارامترهای هدف، دو روش را مورد بررسی دقیقتری قرار داده و میزان کارایی آنها را در تخمین پارامترهای هدف برای اهداف با مانور زیاد مورد ارزیابی قرار می دهد. [8-9] با توجه به ضعف نسبی هر دو الگوریتم در تخمین پارامترهای اهداف با مانور زیاد، راهکاری بر اساس بازنشانی ماتریس کواریانس¹ خطا ارائه می گردد که بهبود قابل ملاحظه ای در تشخیص پارامترهای اهداف با مانورهای زیاد به همراه می آورد.

کلمات کلیدی: اهداف با مانور زیاد، فیلتر کالمن، شناسایی پارامترهای هدف، مدلهای عدم قطعیت فیشر و بیزین

۱. مقدمه

الگوریتم های مختلفی برای شبیه سازی اهداف در مختصات قطبی و کارتیزین وجود دارد، این الگوریتمها در مواجهه با اهداف دارای سرعت ثابت و بدون مانور و با اهداف با مانور از جهت پیاده سازی فیلترهای تخمین مربوطه متفاوت می باشند. در صورتی که شبیه سازی سیستم صحیح نباشد خاصیت ردیابی از دست می رود، معمولاً تخمین زمان دقیق شروع مانور هدف آسان نیست، کارهای خوبی اخیراً برای آشکارسازی زمان شروع مانور صورت پذیرفته است [1].

روشهای مختلفی برای شبیه سازی اهداف با مانور وجود دارد، برای مثال، استفاده از فیلترهای کالمن از درجات مختلف و سوئیچ بین آنها، تخمین شتاب در حین مانور، به شکل دسته ای² از اطلاعات و به شکل بازگشتی³ برای الگوریتم های بلادرنگ⁴ و غیره. در تحقیقی دیگر، شتاب به عنوان یک فرایند تصادفی با خودهمبستگی⁵ نمایی و مشخص فرض می شود، این مدل قادر به ردیابی اهداف با مانور بوده ولیکن عملکرد آن هنگامی که هدف با سرعت ثابت در حال حرکت است کاهش می یابد [2]. در مقاله دیگر روشی برای آشکار سازی و تخمین اهداف با مانور به نام (GLR) نیز ارائه شده است، این روش براساس فرضیه صفر در صورت عدم وجود مانور و دیگری فرضیه وجود مانور عمل می کند، هنگامی که نسبت احتمال آشکار سازی از حد معینی فراتر رود به معنی وجود مانور در حرکت هدف می باشد [3].

در مسائل ردیابی اغلب از فیلترهای کالمن در مختصات قطبی و یا کارتیزین استفاده می شود. الگوریتم های ردیابی هدف در مختصات قطبی برای بکارگیری فیلتر کالمن به راحتی مختصات کارتیزین نیستند، چرا که در مختصات قطبی مدل فرایند یک مدل غیرخطی است ولی در مقابل مدل خروجی خطی است. با توجه به اینکه رادار پارامترهای برد و سمت

² - Batch

³ - Recursive

⁴ - Online

⁵ - Auto Correlation

¹ - Matrix Covariance Presetting

$$\begin{aligned}
X(n+1) &= F(n)X(n) + G(n)w(n) \\
z(n) &= H(n)X(n) + v(n) \\
X(n) & \text{ state} \\
z(n) & \text{ observation} \\
v(n) & \text{ white observation uncertainty} \\
w(n) & \text{ white system driving uncertainty} \\
X(0) & \text{ initial condition}
\end{aligned}
\tag{1}$$

$$\begin{aligned}
E\{v(n_1)v^T(n_2)\} &= \begin{cases} R(n_1) & n_1 = n_2 \\ 0 & n_1 \neq n_2 \end{cases} \\
E\{w(n_1)w^T(n_2)\} &= \begin{cases} Q(n_1) & n_1 = n_2 \\ 0 & n_1 \neq n_2 \end{cases}
\end{aligned}$$

$$E\{x(0)x^T(0)\} = \psi$$

$$E\{x(0)\} = 0, \quad E\{w(0)\} = 0, \quad E\{v(0)\} = 0$$

در بسیاری از کاربردها w می تواند به شکل کاملاً نامشخص^{۱۰} باشد در این صورت مدل به شکل مدل فیشر درخواهد آمد، در برخی از موارد مدل فیشر به عنوان حالت حدی مدل بیزین وقتی که $Q(0) = \infty I$ می شود در نظر گرفته می شود. البته باید توجه داشت که این دو مدل از نظر مفهومی با یکدیگر تفاوت زیادی دارند [4].

۳. فیلتر سازی در مدل های بیزین

در مدل بیزین برای عدم قطعیت ها از مدل های احتمالاتی اتفاقی استفاده می شود و $X(0)$, $v(n)$, $w(n)$ به عنوان متغیرهای تصادفی سفید با میانگین صفر فرض می شوند ماتریسهای $H(n)$, $F(n)$, $G(n)$ در معادله (۱) به عنوان توابع معلوم فرض شده و میباید با توجه به مشاهدات تا زمان n_2 , $z(1), \dots, z(n_2)$ بردار $X(n_1)$ را تخمین زد که به فرمولهای معمول فیلتر کالمن به شکل زیر منجر می شود:

$$\begin{aligned}
\hat{X}(N+1|N) &= F(N)\hat{X}(N|N) + K(N+1)[z(N+1) \\
&\quad - H(N+1)F(N)\hat{X}(N|N)] \\
K(N+1) &= \Sigma(N+1|N)H^T(N+1)R^{-1}(N+1) \\
\Sigma(N+1|N+1) &= \Sigma(N+1|N) - \\
&\quad \Sigma(N+1|N)H^T(N+1)[R(N+1) + H(N+1) \\
&\quad \Sigma(N+1|N)H(N+1)^T]H(N+1)\Sigma(N+1) \\
\Sigma(N+1|N) &= F(N)\Sigma(N|N)F^T(N) \\
&\quad + G(N)Q(N)G^T(N) \\
\Sigma(0|0) &= 0, \quad \hat{X}(0|0) = 0
\end{aligned}
\tag{2}$$

که $\Sigma(N|N)$ ماتریس کواریانس خطا و $\Sigma(N+1|N)$

هدف را (مختصات قطبی) تخمین می زند، مدل های قطبی برای مدلسازی نویزهای اندازه گیری وضعیت هدف، مناسبتر هستند و در مختصات کارتزین اگر چه از فیلتر کالمن به دلیل خطی بودن مدل فرآیند در شبیه سازی و تخمین پارامترهای هدف استفاده می شود ولی خطاهای اندازه گیری برد و سمت باید از مختصات کارتزین به قطبی تبدیل شود که مدل غیرخطی خروجی رادار را نتیجه می دهد [4].

یکی از روشهای دیگر در شبیه سازی اهداف با مانور از طریق تبدیل مسئله ردیابی اهداف با مانور به مدل های استاندارد بیزین و فیشر است در واقع این روش بر مبنای مدلسازی هدف به شکل فضای حالت و با پیاده سازی فیلتر کالمن افزوده^۶ استوار است و مدل سازی هدف با بردار وضعیت مکان و سرعت که در آن شتاب به شکل یک ورودی ناشناخته به سیستم اعمال می گردد، در نظر گرفته شده است. این روش نتایج خوبی در مقایسه با سایر روشها به دست می دهد، خصوصاً اینکه در این روش، میزان بایاس بودن خطای ردیابی به سمت صفر میل می کند و دارای هیچ بایاسی در ردیابی اهداف با مانور کم نمی باشد [9].

۲. مدل های عدم قطعیت^۷

دو مدل اساسی در شبیه سازی عدم قطعیتها، مدل های بیزین^۸ و فیشر^۹ می باشد این مدلها دو شکل شناخته شده از فرآیندهای فضای حالت به شکل ساختارهای سفید می باشند. مدل بیزین یکی از مهمترین و معمول ترین مدل های عدم قطعیت است. در مدل های بیزین عدم قطعیت به شکل متغیرهای تصادفی و یا فرآیندهای اتفاقی با توزیع احتمالاتی کاملاً مشخص و یا با گشتاورهای اول و دوم معین مدل می شوند و به شکل زیر می تواند نمایش داده شوند.

⁶ - Augmented Kalman Filter

⁷ - Models of Uncertainty

⁸ - Bayesian

⁹ - Fisher

¹⁰ - Completely Unknown

ماتریس کواریانس خطای یک قدم رو به جلو است.

$$\hat{X}^m(n+1|n) = \hat{X}(n+1|n) + M(n+1|n)u(n) \quad (5)$$

$$\hat{X}^m(n|n) = X(n|n) + N(n)u(n-1)$$

که در آن

$$M(n+1) = FN(n) + C(n) \quad (6)$$

$$N(n) = [I - K(n)H]M(n)$$

اندیس m نشانگر حالت هدف با مانور است.

$K(n)$ بهره و $\hat{X}(n+1|n)$ پیش بینی حالات در زمان $n+1$ ام

است. که با توجه به مشاهدات تا نمونه n ام بدست می آید.

تخمین $\hat{u}(n)$ به شکل جملاتی از باقیمانده $r^m(n)$ از فیلتر

مانور زیر قابل استخراج است

$$\hat{u}(n) = \hat{u}(n-1) + G_u(n)r^m(n) \quad (7)$$

که در آن

$$G_u(n) = P_u(n-1)W$$

$$W = M^T(n)H^T(HM(n)P_u(n-1)M^T(n)H^T + R^m(n))^{-1} \quad (8)$$

$$P_u(n) = P_u(n-1) - P_u(n-1)WHM(n)P_u^T(n-1)$$

در معادله (۸)، $R^m(n)$ ، کواریانس اصلاح شده اندازه گیری

است و می توان نوشت:

$$R^m(n) = HP^m(n|n-1)H^T + R \quad (9)$$

کواریانس خطای پیش بینی و تخمین برای مدل با مانور به

شکل زیر است:

$$P^m(n|n) = P(n|n) + N(n)P_u(n)N^T(n) \quad (10)$$

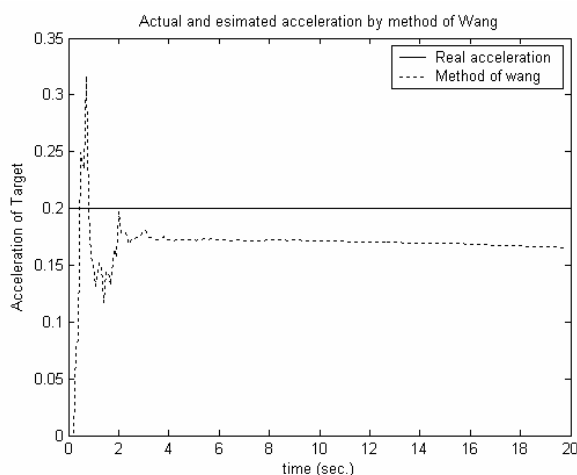
$$P^m(n+1|n) = P(n+1|n) + M(n+1)P_u(n)M^T(n+1)$$

شکل (۱) نشانگر عملکرد ردیابی به روش فوق است. در این

شبیه سازی شتاب در محور X و Y عبارت است از:

$$a_x(t) = 0.2 \sin\left(\frac{2\pi t}{1000}\right), a_y(t) = 0.2 \cos\left(\frac{2\pi t}{1000}\right)$$

$$a(t) = \sqrt{a_x^2(t) + a_y^2(t)} = 0.2 \text{ m/s}^2 \text{ این:}$$



شکل (۱): عملکرد تخمین شتاب به روش Wang

۴. الگوریتم ردیابی

در بسیاری از مقالات به روشهای شبیه سازی هدف در فضای

حالت اشاره شده است [5-8].

در این گونه تحقیقات فرض شده است که هدف در یک

مختصات دو بعدی مانند یک کشتی در یک صفحه در حال

حرکت است و مدل فضای حالت به شکل زیر برای بیان هدف

بدون مانور $u(n)=0$ در نظر گرفته می شود،

$$X(n+1) = F(n)X(n) + G(n)w(n) \quad (3)$$

$$X = [x \quad \dot{x} \quad y \quad \dot{y}]^T$$

که در آن

F ماتریس انتقال و G ماتریس نویز سیستم است، و w نویز

سیستم است که به شکل سفید با واریانس σ_w^2 در نظر گرفته

می شود، ماتریس های F, G از گسسته سازی معادلات حالت

پیوسته با زمان نمونه برداری T با استفاده از قوانین نیوتن حاکم

بر حرکت بدست می آیند در این معادلات Y, X موقعیت

هدف است و F, G با زمان نمونه برداری T (فواصل زمانی

بین نمونه ها می باشد) به شکل زیر است:

$$F = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} T^2/2 & T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T^2/2 & T \end{bmatrix}^T$$

معادله اندازه گیر به شکل زیر خواهد بود:

$$z(n) = H(n)X(n) + v(n)$$

که در آن H ماتریس اندازه گیر و $v(k)$ نویز اندازه گیر می

باشد و به شکل گوسی با ماتریس کواریانس خطای R در نظر

گرفته می شود و ماتریس H به شکل زیر داده می شود:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

در مدل با مانور، شتاب به شکل یک جمله اضافه به معادله (3)

اعمال می گردد:

$$X(n+1) = FX(n) + Cu(n) + Gw(n) \quad (4)$$

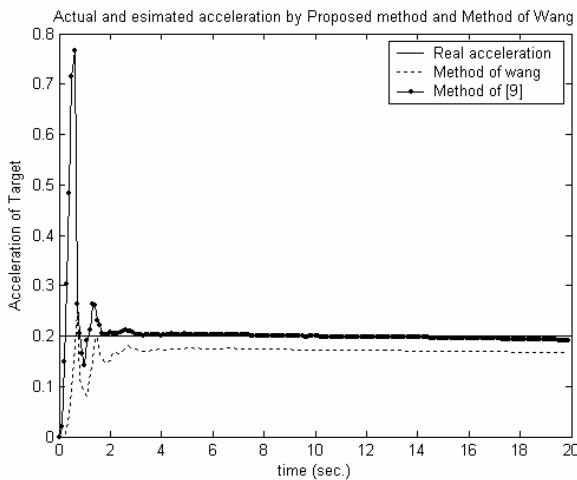
به عنوان مثال در یکی از مقالات موفق در زمینه پیاده سازی

الگوریتم های ردیابی هدف [7]، مدلهای حالت برای دو

حالت، هدف با مانور و بدون مانور به شکل زیر به یکدیگر

مرتبط می شوند:

نتایج شبیه سازی الگوریتم پیشنهادی [9] و مقایسه آن با روش Wang در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): عملکرد الگوریتم [9] و مقایسه آن با روش Wang

با توجه به شکل (۲) دیده می شود، عملکرد ردیابی با این روش صرفنظر از رفتار گذرای آن در چند ثانیه اول، بسیار مطلوب بوده و مقدار تخمینی شتاب، بدون بایاس است. عملکرد ردیابی و تخمین پارامترهای هدف از جمله سرعت و فاصله هدف نیز بسیار مناسب بوده که از آوردن اشکال مربوطه صرفنظر شده است.

با توجه به اینکه از فیلتر کالمن در مختصات کارتزین استفاده شده است و ماتریسهای کواریانس نویز در مختصات قطبی رادار در دسترس است (با توجه به کاتالوگهای مربوط به دقت رادار)، در شبیه سازیهای صورت گرفته ماتریسهای کواریانس نویز فرآیند و نویز اندازه گیر (در مختصات کارتزین) بگونه ای انتخاب شده است که پس از تبدیل به مختصات قطبی، پارامتر فاصله و زاویه هدف دارای همان کواریانس متناسب با دقت رادار باشند.

۵. روش تصحیح ماتریس کواریانس خطا

روشهای اشاره شده در بالا در پیاده سازی و ردیابی اهداف با مانور کم بسیار موفق عمل می نمایند و هر کدام نسبت به دیگری دارای مزایا و معایب خاص خود می باشد ولیکن عموم این روشها در ردیابی اهداف با مانور زیاد همانگونه که در نتایج شبیه سازی به آن اشاره خواهد شد دارای ضعفهایی

همانطور که مشاهده می گردد مقدار تخمینی شتاب، دارای بایاس است. در الگوریتم پیشنهادی [9]، ردیابی هدف با بکارگیری روش ترکیبی بیزین و فیشر به شکل افزوده انجام می شود، در واقع در این روش $u(n)$ را به عنوان یک سیگنال نامعین ولی محدود^{۱۱} در معادله مانور در نظر گرفته، در این صورت با دو عدم قطعیت توأم، یکی $w(n)$ به عنوان نویز سفید (مدل بیزین) سیستم و دیگری $u(n)$ به عنوان یک جمله نامشخص ولی محدود (مدل فیشر) که به سیستم افزوده شده سروکار خواهیم داشت. حال با فرض اینکه $u(n)$ به عنوان یک بردار حالت جدید مطرح باشد، معادله ۴ به یک مدل بدون مانور با معادلات حالت سیستم افزوده شده به شکل بیزین استاندارد در معادله های ۱ و ۲ تبدیل میشود.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X(n+1) \\ u(n+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} F & C \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X(n) \\ u(n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G \\ 0 \end{bmatrix} w(n) \\ z(n) &= H(n)X(n) + v(n) \\ X_{Aug}(n) &= [X(n) \quad u(n)]^T; F_{Aug} = \begin{bmatrix} F & C \\ 0 & I \end{bmatrix}; G_{Aug} = \begin{bmatrix} G \\ 0 \end{bmatrix} \\ z(n+1) &= HX(n+1) + v(n+1) \\ &= H\{FX(n) + Cu(n) + Gw(n)\} + v(n+1) \\ z(n+1) &= [HF \quad HC] \begin{bmatrix} X(n) \\ u(n) \end{bmatrix} + HGw(n) + v(n+1) \quad (11) \\ \Rightarrow H_{Aug} &= [HF \quad HC]; V_{Aug} = HGw(n) + v(n+1) \end{aligned}$$

و به این ترتیب یک مدل استاندارد بیزین و فیشر ایجاد می شود و می توان فیلتر کالمن استاندارد را روی آن اعمال نمود. در واقع در این حالت می توان X و u را به شکل همزمان تخمین زد.

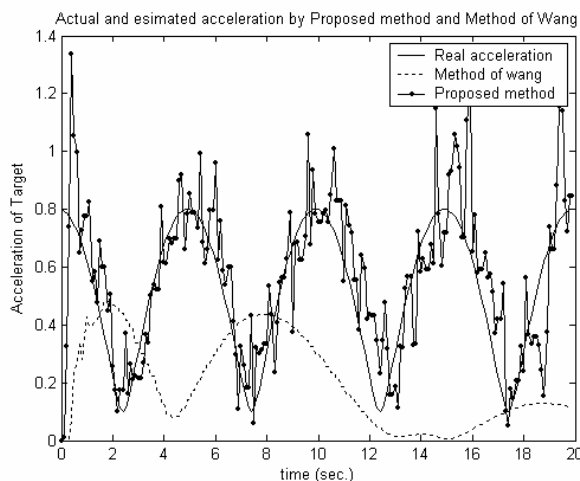
$$\begin{aligned} X_{Aug}(n+1) &= F_{Aug} X(n) + G_{Aug} w(n) \\ Z_{Aug}(n) = z(n+1) &= H_{Aug}(n)X_{Aug}(n) + V_{Aug}(n) \quad (12) \end{aligned}$$

از آنجایی که $w(n), v(n)$ نیز نویزهای غیرهمبسته^{۱۲} هستند می توان ماتریس کواریانس جدید افزوده شده را به شکل زیر بدست آورد [9]:

$$\begin{aligned} R_{Aug} &= E\{V_{Aug} V_{Aug}^T\} = \\ &= E\{(HGw(n) + v(n+1))(HGw(n) + v(n+1))^T\} \\ &= HGE\{w(n)w(n)^T\}G^T H^T + E\{v(n+1)v(n+1)^T\} \\ \Rightarrow R_{Aug} &= E\{V_{Aug}(n)V_{Aug}^T(n)\} \quad (13) \\ &= HGQG^T H^T + R \end{aligned}$$

¹¹ - Unknown but Bounded

¹² - Uncorrelated



شکل (۴): عملکرد الگوریتم پیشنهادی [9] همراه با بازنشانی ماتریس

$$\sum(n|n) = k_p \sum(0|0) = 10I \text{ کواریانس خطا بصورت}$$

گام تصحیح کوچک است و پیشنهاد می شود از بازنشانی ماتریس کواریانس خطا به شکل $\sum(n+1|n+1) = k_p \sum(n|n); k_p > 1$ استفاده کرد. شکل (۵ و ۶) عملکرد مطلوب ردیابی الگوریتم همراه با بازنشانی پیشنهادی ماتریس کواریانس خطا با این روش را در مقایسه با روش Wang (با وجود بازنشانی ماتریس کواریانس خطا) نشان می دهد.

۶. نتیجه گیری

روش ارائه شده در این مقاله به منظور تخمین و ردیابی اهداف با مانور زیاد با استفاده از روش فیلتر کالمن افزوده [9] در مختصات کارتیزین توسعه داده شده است. از تصحیح و بازنشانی ماتریس کواریانس خطای ردیابی هدف به دو شکل متداول و پیشنهادی استفاده شده است. شبیه سازی های انجام شده توانائی این روش را در ردیابی اهداف با مانور زیاد نشان می دهد.

بوده بطوریکه اغلب فرآیند ردیابی واگرا می شود. بعنوان مثال اگر شتاب بصورت:

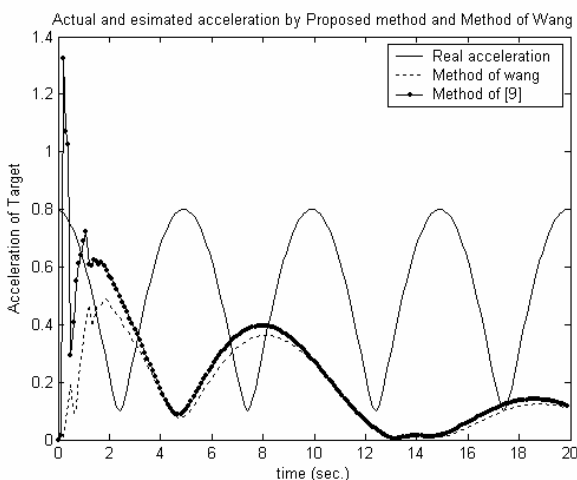
$$a_x(t) = -0.1 \sin\left(\frac{2\pi t}{100}\right), a_y(t) = 0.8 \cos\left(\frac{2\pi t}{100}\right)$$

نظر گرفته شود، روش پیشنهادی [9] و روش Wang عملکردی به شکل (۳) را خواهند داشت.

برای همگرایی بیشتر پارامترهای تخمینی فیلتر کالمن مخصوصا هنگام وجود مانورهای شدید می توان از بازنشانی ماتریس کواریانس خطا^{۱۳} استفاده کرد و در فواصل زمانی معین که به میزان مانور هدف بستگی دارد، $\sum(n|n)$ را به مقدار $\sum(n|n) = k_p \sum(0|0) = k_p I$ تبدیل نمود.

شکل (۴) نشانگر عملکرد ردیابی الگوریتم پیشنهادی همراه با بازنشانی ماتریس کواریانس خطا به روش فوق است.

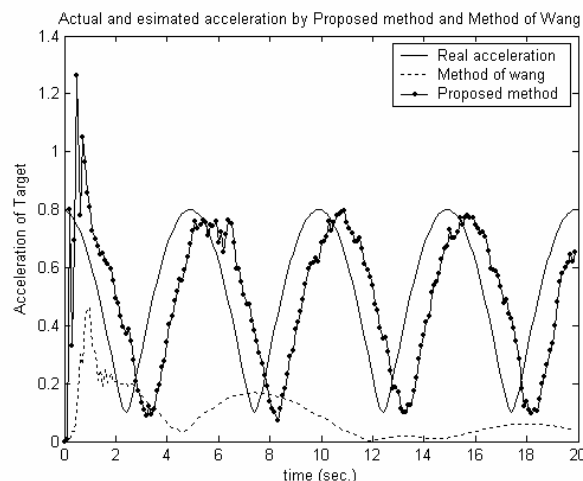
با توجه به اینکه $\sum(n|n)$ جهات صحیح حرکت بسوی نقطه بهینه را دارد بهتر است مقدار جدید به دست آمده نیز این خاصیت را داشته باشد فقط مقدار آن در همان جهت قبلی تقویت شود، در واقع بخاطر کوچکی اندازه $\sum(n|n)$ ، میزان



شکل (۳): عملکرد الگوریتم پیشنهادی [9] و روش

Wang برای اهداف با مانور زیاد

- [3] J. Korn, S. W. Gully, and A. S. Willsky, **Application of the Generalized Likelihood Ratio Algorithm to Maneuver Detection and Estimation**, Proceedings of the 1982 American Control Conference, 792-798. 1982.
- [4] F. C. Schweppe, **Uncertain Dynamic Systems**, Prentice-Hall. 1973.
- [5] A. N. Shirayev, "On Optimal Methods in Quickest Detection Problems," Theory of Probability and Its Application, 8, 1, 22-46. 1963.
- [6] L. Pelkowitz, and S. C. Schwartz, **Asymptotically Optimum Sample Size for Quickest Detection**, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, AES-23, 263-271. 1987.
- [7] Y. Bar Shalom, and K. Birnirwal, **Variable Dimension Filter for Maneuvering Target Tracking**, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, AES- 18, 621-628. 1982.
- [8] T. C. Wang, and P. K. Varshney, **A Tracking Algorithm for Maneuvering Targets**, IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems, Vol. 29, No. 3, 910-924. 1993.
- [9] H. Khaloozadeh, and A. Karsaz, **A Modified Algorithm based on Mixed Bayesian- Fisher Model for Target Maneuver Detection**, International Conference on Communication, Computer and Control Technology (CCCT 2003), Florida, America 2003.

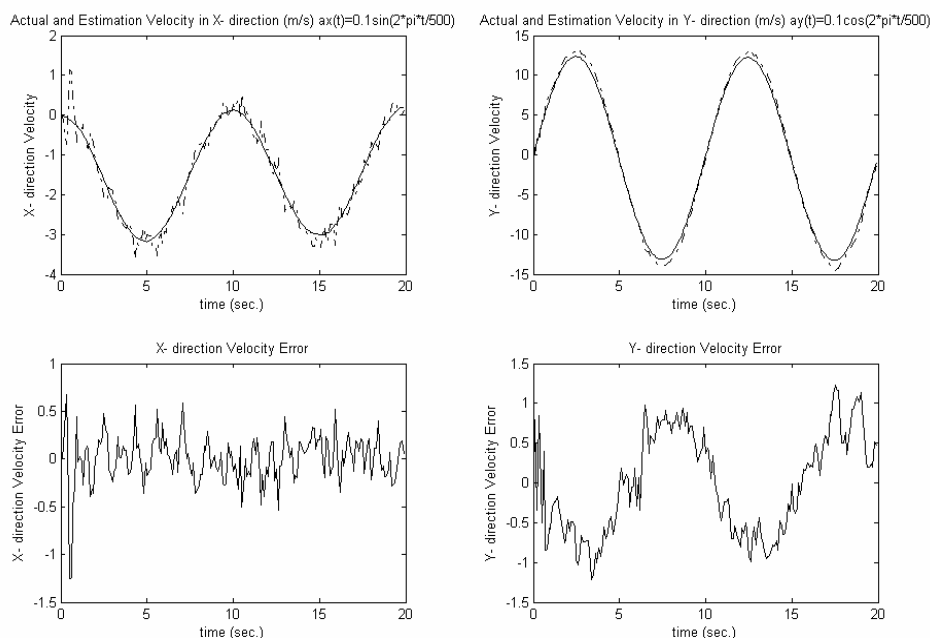


شکل (۵): عملکرد آگوریتیم [9] همراه با بازنشانی ماتریس کواریانس

خطا بصورت پیشنهادی $\sum (n+1|n+1) = k_p \sum (n|n); k_p = 2$

مراجع

- [1] Keche M, Harrison I, **Adaptive Update Time Tracking Using Recursive Input Estimation**, University of Nottingham United Kingdom, IEE 1997.
- [2] R. A. Singer, **Estimating Optimal Tracking Filter Performance for Manned Maneuvering Targets**, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, AES- 6, 473-483. 1970.



شکل (۶): عملکرد ردیابی پارامتر سرعت با آگوریتیم پیشنهادی همراه با بازنشانی ماتریس کواریانس خطا بصورت

$$\sum (n+1|n+1) = k_p \sum (n|n); k_p = 2$$