

بهینه‌سازی مدل‌های چرخش ثابت و سینگر در سیستم‌های ردیابی TWS

پیروز مجدالاشرافی و مهران افتخار

شرکت بسامدآرما

بزرگراه محمدعلی جناح - خیابان بایندریها - کوچه امرالهی - پلاک 31

تلفن: 9- 66050576 فاکس: 66008913

Email: pmajdolashrafi@gmail.com

mehran_er@yahoo.com

چکیده - این مقاله در ارتباط با معرفی ماتریسهای حالت بهینه‌شده برای استفاده در بلوک IMM یک سیستم ردگیری TWS است. نتایج شبیه‌سازیهای انجام‌شده روی این ماتریسها نیز در این مقاله آورده شده است.

کلید واژه - TWS، MTT، فیلتر کالمن، مدل چرخشی، مدل سینگر

1- مقدمه

ماتریسهای حالت مختلفی استفاده می‌شود که ماتریس حالت مدل چرخشی و سینگر کاملترین انواع آنها می‌باشند [1]. اما از آنجائیکه این مدلها، به ترتیب دارای پنج و شش متغیر حالت می‌باشند و میزان محاسبات در فیلتر کالمن با توان سوم تعداد متغیرهای حالت متناسب است، این تعداد متغیرهای حالت احتیاج به محاسبات بسیار زیادی دارد، مدل بهینه‌شده آنها با چهار متغیر و با همان دقت ارائه می‌شود و میزان محاسبات نیز به نصف تا یک‌سوم کاهش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازیهای انجام‌شده روی این مدلها هم در این مقاله آورده شده است.

2- دروازه‌بندی (Gating)

دروازه‌بندی، تکنیکی است که از آن در اکثر الگوریتمهای تخصیص داده جهت حذف فرضیه‌های نامحتمل همبستگی رد- مشاهده و کاهش تعداد فرضیات استفاده می‌گردد. طبق تعریف، دروازه هر رد، ناحیه‌ای از منطقه مراقبت حول نقطه

سیستمهای (Multiple Target Tracking) MTT از کاربرد روزافزونی در سیستمهای راداری برخوردارند. مزیت این سیستمها بر سیستمهای (Single Target Tracking) STT یکپارچه کردن رادارهای جستجو و ردگیری، صرف زمان کمتر، قابلیت ردگیری چند هدف در یک زمان و اختفا محل رادار از دید هدف می‌باشد. منظور ما از ردگیری، عبارتست از استخراج مسیر حرکت اهداف موجود در ناحیه مراقبت، با استفاده از سنجشهای رادار. یکی از روشهای MTT در سیستمهای راداری روش TWS با رادار MSA (Mechanically Scanned Antenna) می‌باشد که در آن، اطلاعات هدف در فاصله‌های زمانی یکسان به گیرنده راداری می‌رسد. در این سیستمها میتوان از فیلترهای ab ، abg یا از فیلترهای پیشگوی کالمن استفاده کرد.

برحسب رفتار و نوع هدف مورد نظر، در این سیستمها از

کواریانس R است.

بنابراین با استفاده از معادلات (1) و (2) معادلات فیلتر کالمن به صورت زیر می‌شود:

$$\hat{X}(k|k) = \hat{X}(k|k-1) + K(k)[Y(k) - H\hat{X}(k|k-1)] \quad (3)$$

$$K(k) = P(k|k-1)H'[HP(k|k-1)H' + R]^{-1} \quad (4)$$

$$P(k|k) = [I - K(k)H]P(k|k-1) \quad (5)$$

$$\hat{X}(k+1|k) = f\hat{X}(k|k) + f(k+1|k) \quad (6)$$

$$P(k+1|k) = fP(k|k)f' + Q \quad (7)$$

ماتریس بهره کالمن در معادله (5) مستقیماً از معادله (4) بدست می‌آید.

درواقع، ماتریس کواریانس، براساس بردار خطای تخمین با توزیع گوسی با میانگین صفر طبق معادله (8) تعریف می‌شود.

$$p(k) = E\{[X(k) - \hat{X}(k)][X(k) - \hat{X}(k)]'\} \quad (8)$$

بردار تفاضل بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده به صورت معادله (9) تعریف می‌شود و ماتریس کواریانس آن به وسیله معادله (10) محاسبه می‌گردد.

$$\tilde{Y}(k) = Y(k) - H\hat{X}(k|k-1) \quad (9)$$

$$S = HPH' + R \quad (10)$$

4- مدل‌های دینامیک اهداف

محاسبات مدل هدف، برخلاف آنچه در رادار معمول است، در دستگاه مختصات دکارتی انجام شده است. زیرا استفاده از مختصات قطبی، باعث غیرخطی شدن معادلات حرکت اهداف، بزرگ شدن بعد معادلات و پیچیده شدن فیلتر کالمن، می‌شود. عدم قطعیت در تخمین حالت اهداف به جهت دینامیک تصادفی اهداف یا عدم مدلسازی بعضی از خصوصیات دینامیکی هدف رخ می‌دهد. این عدم قطعیت، معمولاً به وسیله ماتریس کواریانس نویز پردازش Q، مدل می‌شود. انتخاب ماتریس Q بیش از آنکه بر توسعه مدل‌های فیزیکی دقیق مبتنی باشد، براساس آزمایش‌هایی نظیر شبیه‌سازی مونت کارلو، به دست می‌آید.

سیستم‌های TWS معمولاً از محل هدف x، سرعت

پیش‌بینی شده آن است که با احتمال بسیار بالایی مشاهده متعلق به رد، در آن قرار می‌گیرد.

الگوریتم‌های دروازه‌بندی از موقعیت پیش‌بینی شده هدف و میزان دقت آن، جهت تعیین این ناحیه استفاده می‌کنند. شکل دروازه در میزان محاسبات عمل دروازه‌بندی بیشترین تأثیر را دارد. عامل بعدی تأثیرگذار در روی زمان دروازه‌بندی، تعداد مشاهدات شرکت‌کننده در این فرآیند است. در شبیه‌سازیهای انجام شده، از دروازه‌بندی بیضوی استفاده شده است.

3- تعریف فیلتر کالمن

ابتدا فرض می‌کنیم که فرآیند تغییرات هدف را می‌توان به صورت فرم مارکوف زمان-گسسته در نظر گرفت [2]. یعنی

$$X(k+1) = fX(k) + q(k) + f(k+1|k) \quad (1)$$

در معادله (1)، X بردار حالت n تائی هدف است که شامل پارامترهایی می‌باشد که باید تخمین زده شود. همچنین ماتریس f ماتریس انتقال حالت می‌باشد. ماتریس q(k) ماتریس نویز پردازش گوسی سفید با میانگین صفر می‌باشد که کواریانس آن را با Q نشان می‌دهیم. ماتریس f(k+1|k) نیز یک ماتریس ورودی مشخص است که مثلاً می‌تواند حرکت حسگر را مدل کند.

معادله (1) یک معادله دیفرانسیلی است که تغییرات مشخصات هدف را به صورت یک فرآیند مارکوف و به وسیله بردار حالت نشان می‌دهد. البته روابط دینامیکی هدف، معمولاً به صورت زمان-پیوسته، به دست می‌آید و سپس به صورت زمان-گسسته معادله (1) تبدیل می‌شود.

ماتریس q(k) در واقع ماهیت تصادفی فرآیند تغییر پارامترهای دینامیک هدف را در معادله، وارد می‌کند.

مشخصه‌هایی از هدف که اندازه‌گیری می‌شوند، را می‌توان به صورت ترکیب خطی متغیرهای حالت بعلاوه یک ماتریس نویز ناهمبسته به صورت معادله (2) مدل کرد [1].

$$Y(k) = HX(k) + V(k) \quad (2)$$

در این رابطه، H یک ماتریس $m \times n$ به نام ماتریس اندازه‌گیری است که در آن m بعد بردار اندازه‌گیری می‌باشد و V(k) نویز اندازه‌گیری گوسی سفید با میانگین صفر و

$$f = \frac{\partial f}{\partial X}(\hat{X}) = \begin{bmatrix} 1 & \sin(wT)/w & 0 & -(1-\cos(wT))/w & j_{15} \\ 0 & \cos(wT) & 0 & -\sin(wT) & j_{25} \\ 0 & (1-\cos(wT))/w & 1 & \sin(wT)/w & j_{35} \\ 0 & \sin(wT) & 0 & \cos(wT) & j_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$j_{15} = \frac{\partial x}{\partial w}(\hat{x}) \quad j_{25} = \frac{\partial v_x}{\partial w}(\hat{x})$$

$$j_{35} = \frac{\partial y}{\partial w}(\hat{x}) \quad j_{45} = \frac{\partial v_y}{\partial w}(\hat{x})$$

4-2-1- مدل بهینه شده

در مدل بهینه شده، جهت کاهش ابعاد ماتریس حالت و همچنین سازگاری با فیلتر کالمن ارائه شده، w از روی معادله 12 و به صورت غیر خطی و جدای از معادله دیفرانسیلی خطی حالت محاسبه شده، و ماتریس f با استفاده از مقدار آن، به روز می شود. همچنین مقادیر j_{15} ، j_{25} ، j_{35} و j_{45} به کمک معادلات

$$x(k+1) = x(k) + T[SWv_x(k) - CWv_y(k)]$$

$$y(k+1) = y(k) + T[CWv_x(k) + SWv_y(k)]$$

و

$$SW = \frac{\sin wT}{wT} \quad CW = \frac{1 - \cos wT}{wT}$$

محاسبه شده، در نهایت ماتریس انتقال حالت و معادله مشخص کننده w به شکل زیر تبدیل می شود

$$f = \frac{\partial f}{\partial X}(\hat{X}) = \begin{bmatrix} 1 & T \cos(wT) & 0 & -T \sin(wT) \\ 0 & \cos(wT) - wT \sin(wT) & 0 & -\sin(wT) - wT \cos(wT) \\ 0 & T \sin(wT) & 1 & T \cos(wT) \\ 0 & \sin(wT) + wT \cos(wT) & 0 & \cos(wT) - wT \sin(wT) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$w = \frac{-v_x(k)v_y(k-1) + v_y(k)v_x(k-1)}{T(v_x^2(k) + v_y^2(k))} \quad (15)$$

در معادلات بالا T فاصله زمانی بین دو مشاهده است.

شبیه سازیهای انجام شده براساس ماتریس انتقال حالت بهینه شده (14) در زیر آورده شده است.

هدف v_x ، و شتاب احتمالی هدف a_x ، به عنوان متغیرهای حالت استفاده می کنند که به طور معمول، شتاب طی چند زمان نمونه برداری (T) ثابت می ماند [3].

4-1- مدل دوبعدی چرخش هدف

بسیاری از مدلهایی که برای ردیابی استفاده می شوند، با این فرض طراحی می شوند که ردیابی در محورهای x, y, z مستقل از یکدیگر انجام می شود و در نتیجه فیلترها مستقل می شوند. اما در عمل، بسیاری از اهداف، به خصوص هواپیماهایی که مانور سریع دارند، حرکاتی را بروز می دهند که به شدت در محورهای مختلف به هم وابسته اند. هدف از مدل دوبعدی چرخش هدف، مدلی است که با در نظر گرفتن اینگونه اهداف، قابلیت استفاده در فیلتر کالمن معرفی شده را داشته باشد. براساس مدل ارائه شده توسط maybeck و bar-shalom [4] بردار شتاب \vec{a} ، براساس سرعت زاویه ای w ، بردار سرعت \vec{v} و بردار نویز سفید ورودی \vec{w} به صورت زیر تعریف می شود

$$\vec{a} = -w^2 \vec{v} + \vec{w} \quad (11)$$

سرعت زاویه ای w استفاده شده در این معادله، از رابطه زیر به دست می آید.

$$w = \frac{|\vec{v} \times \vec{a}|}{v^2} \quad (12)$$

4-2- محاسبات مدل چرخش افقی

ساختار معمول مدل چرخش افقی به صورت زیر تعریف می شود.

پنج متغیر حالت فیلتر توسط دو متغیر موقعیت x و y و دو متغیر سرعت v_x و v_y و سرعت زاویه ای هدف w تعریف می شود.

ماتریس انتقال حالت این مدل به طور معمول، توسط معادله (13) تعریف می شود

رادار و هشدارهای کاذب نیز در آن لحاظ شده است.

3-4- مدل سینگر

مشابه آنچه برای مدل چرخشی انجام شد، برای مدل شش حالت سینگر هم با حذف شتاب از متغیرهای حالت آن و اضافه کردن جملات مربوط به آن به ورودی سیستم قابل انجام است. از آنجا که در اکثر رادارها، شتاب هدف را به صورت نرخ تغییرات سرعت محاسبه می کنند، در شبیه سازیهای مربوط به مدل سینگر هم از همین روش استفاده شده است. با این بهینه سازی، ماتریس حالت سیستم از فرم $\begin{bmatrix} \ddot{x} & \dot{x} & \ddot{y} & \dot{y} \end{bmatrix}$ به فرم $\begin{bmatrix} \dot{x} & x & \dot{y} & y \end{bmatrix}$ تبدیل شده و معادله حالت آن از شکل

$$X(k+1) = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{(aT-1+e^{-aT})}{a^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \frac{(1-e^{-aT})}{a} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-aT} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & T & \frac{(aT-1+e^{-aT})}{a^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \frac{(1-e^{-aT})}{a} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-aT} \end{bmatrix} X(k)$$

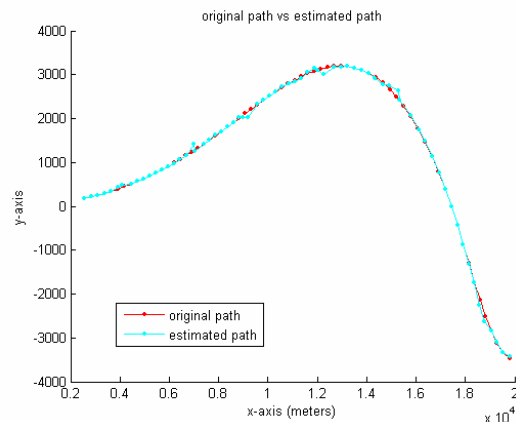
به شکل

$$X(k+1) = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} X(k) + \begin{bmatrix} \frac{(aT-1+e^{-aT})}{a^2} \ddot{x}(k) \\ \frac{(1-e^{-aT})}{a} \ddot{x}(k) \\ \frac{(aT-1+e^{-aT})}{a^2} \ddot{y}(k) \\ \frac{(1-e^{-aT})}{a} \ddot{y}(k) \end{bmatrix}$$

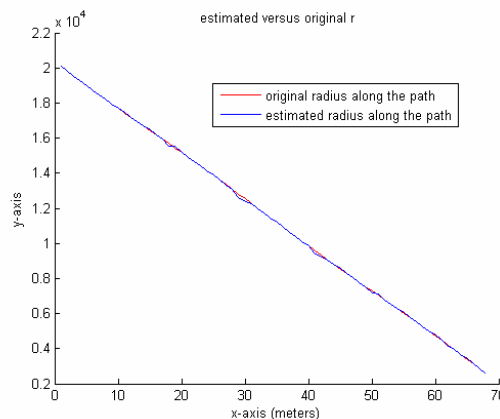
$$\ddot{x}(k) = \frac{\dot{x}(k) - \dot{x}(k-1)}{T}$$

$$\ddot{y}(k) = \frac{\dot{y}(k) - \dot{y}(k-1)}{T}$$

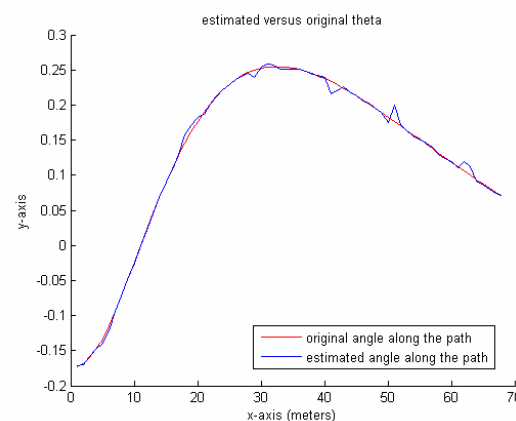
تبدیل می شود. شکل های 4 و 5 و 6 نتایج شبیه سازیهای انجام شده روی این مدل، با همان پارامترهای هدف قبلی را نشان می دهد.



شکل 1: مسیر حرکت هدف و مسیر تخمین زده شده با استفاده از مدل چرخشی بهینه شده



شکل 2: فاصله واقعی هدف و تخمین آن با استفاده از مدل چرخشی بهینه شده



شکل 3: زاویه واقعی هدف بر حسب درجه و تخمین آن با استفاده از مدل چرخشی بهینه شده

در این شبیه سازی، هدف با سرعت اولیه 300 متر بر ثانیه از فاصله 20400 متری، روی یک مسیر تصادفی به سمت رادار حرکت می کند. همچنین مقادیر نوعی خطای اندازه گیری

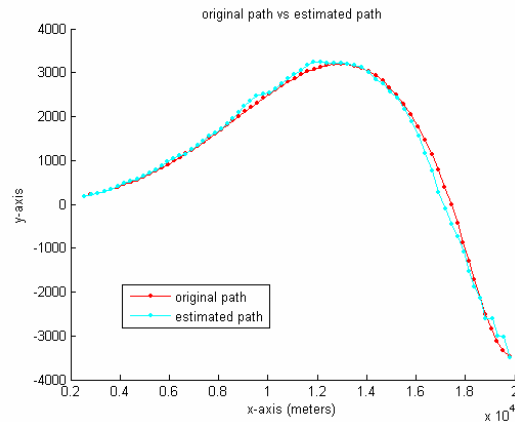
چهارم تغییر فیلتر کالمن تطابق دارند و حجم پردازشی خیلی بالایی هم ندارند، می‌توانند در سیستمهای MTT علی‌الخصوص سیستمهای TWS مورد استفاده قرار گیرند.

سیاسگزاری

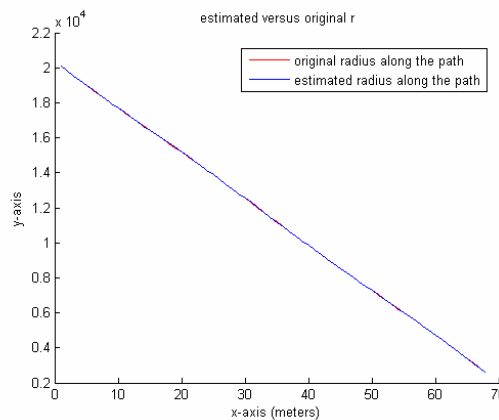
برخود لازم می‌دانیم که از زحمات بی‌دریغ سرکار خانم مهندس ناطقی در شبیه‌سازی سیستم و حمایت‌های جناب آقای دکتر باستانی و جناب آقای مهندس عارفیان، که ما را در انجام این پروژه، یاری کردند، تشکر و قدردانی کنیم.

مراجع

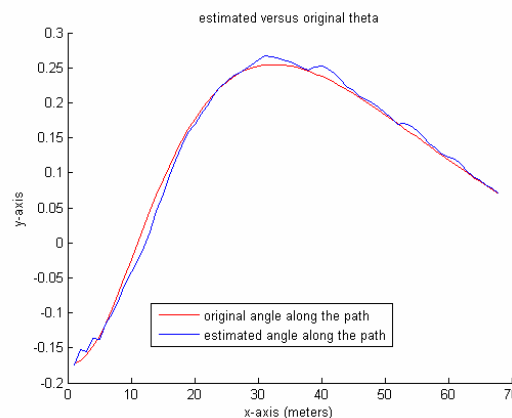
- [1] Blackman-Samuel, Popoli-Robert, Design and Analysis of Modern Tracking systems, Artech House, 1999.
- [2] Grewal-Mohinder, Andrews-Angus, Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB, Second Edition, John Wiley & Sons, 2001.
- [3] Mahafza-Bassem, Elsherbeni-Atef, Matlab Simulations for Radar Systems Design, CRC Press, 2004.
- [4] Bar-shalom-y, Multitarget_ Multisensor Tracking: Applications and Advances, Artech house, 1992.
- [5] Rong Li-X, Multiple-Model Estimation with Variable Structure-part II: Model-set Adaption, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol 45, No. 11, November, 2000.



شکل 4: مسیر حرکت هدف و مسیر تخمین‌زده‌شده با استفاده از مدل سینگر بهینه‌شده



شکل 5: فاصله واقعی هدف و تخمین آن با استفاده از مدل سینگر بهینه‌شده



شکل 6: زاویه واقعی هدف بر حسب درجه و تخمین آن با استفاده از مدل سینگر بهینه‌شده

5- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدل‌های بهینه‌شده چرخشی و سینگر، ارائه شده است. از آنجائیکه این مدل‌ها با ساختار متداول