

## تخمین مانور چند ربات زیر آبی توسط فیلتر کالمن دومرحله ای و شبکه عصبی

عباس مرویان مشهد<sup>1</sup>، امیر امینیان<sup>2</sup> و علی کارساز<sup>3</sup>

<sup>1</sup>موسسه آموزش عالی غیر انتفاعی خراسان، Abbas.Control@gmail.com

<sup>2</sup>موسسه آموزش عالی غیر انتفاعی خراسان، Amir.Aminian7sh@gmail.com

<sup>3</sup>موسسه آموزش عالی غیرانتفاعی خراسان، A\_Karsaz1@yahoo.com

چکیده - ردیابی اهداف زیر آبی دارای مانور در سیستم رادار بسیار پیچیده است زیرا شتاب هدف بطور مستقیم قابل اندازه گیری نیست. این عمل ممکن است باعث بوجود آمدن خطای ردیابی زیادی شود که تخمین را در هنگام مانور واگرا خواهد کرد. در این مقاله دو فیلتر کالمن مرتبط با هم استفاده شده است که یکی برای دنبال کردن تخمین وضعیت وسیله زیر آبی خودکار و دیگری برای تخمین وضعیت مانور آن وسیله می باشد. بر اساس این روش، شتاب هدف بطور تقریبی شناسایی شده و بصورت لحظه ای تخمین زده می شود. همچنین نشان داده می شود، ترکیب داده ها توسط شبکه عصبی هاپفیلد رقابتی که بصورت وابسته با سیستم ردیابی هدف چندمرحله ای عمل می کند، قابلیت ردیابی اهداف را دارد. کلید واژه- اهداف دارای مانور، ترکیب داده ها، سیستم ردیابی هدف چندگانه، شبکه عصبی رقابتی، فیلتر کالمن دو مرحله ای

با استفاده از الگوریتم شبکه های عصبی هاپفیلد رقابتی مبتنی بر داده ها، الگوریتم ارتباط داده ها برای ردیابی هدف چندگانه نیز ارائه شده است [4].

اگر چه مسائل مربوط به ردیابی توسط بسیاری از نویسندگان بررسی شده اند، اما هنوز بحث های زیادی پیرامون این مسائل وجود دارد. در این مقاله، دو فیلتر کالمن برای ردیابی اهداف دارای مانور پیشنهاد شده است. در این رویکرد، دو فیلتر کالمن مشترک طراحی شده اند که یکی برای دنبال کردن تخمین وضعیت و دیگری برای تخمین وضعیت در حالتی که مانور رخ میدهد، می باشد. علاوه بر این، الگوریتم شبکه های عصبی هاپفیلد رقابتی (CHNN) را برای ترکیب داده های سیستم ردیابی چندگانه اعمال می کنیم. بر اساس این رویکرد، می توانیم مسائل مانور و ارتباط داده ها را به طور همزمان حل کنیم.

## 2- مدل سازی

### 2-1- مدل سازی ربات زیر آبی

در بوجود آمدن یک استراتژی موثر برای ردیابی و حتی کنترل وسیله نقلیه زیر آبی خودکار (AUV)، نکته کلیدی توانایی آزمایش تاثیر واقعی استراتژی پیشنهاد شده در یک محیط بدون ساختار از پیش مشخص شده در عمق دریا و آنالیز میزان تجمع بین زیر سیستم های مختلف است که معماری

## 1- مقدمه

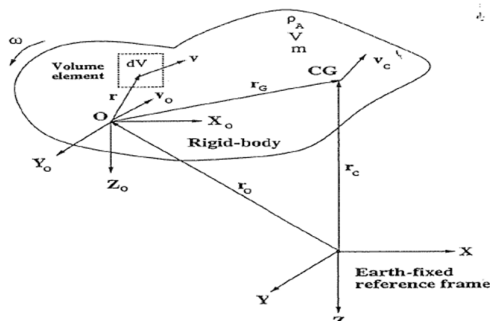
ردیابی هدف چندگانه (Multiple Targets Tracking) یک نیاز اساسی برای سیستمهای رادار می باشد. اهداف زیر آبی دارای مانور و بدون مانور باید بسرعت ردیابی شوند. زمانی که وضعیت مانور داری رخ دهد، تخمین هدف به سادگی واگرا می شود. اگر اهداف زیر آبی دارای مانور باشند ردیابی پیچیده می شود زیرا رادار نمی تواند بصورت مستقیم شتاب هدف را اندازه گیری کند. در فرآیند ردیابی چگونگی تعیین و تخمین موثر وضعیت مانور هدف بسیار با اهمیت است.

تکنیک های مربوط به ردیابی اهداف چند گانه دارای مانور در مقالات متعددی بررسی شده اند. به عنوان مثال، الگوریتم برآورد شتاب بر اساس محدوده اندازه گیری سرعت در [1] بررسی شده است. تداخل مدلهای چندگانه (IMM) با هم و روشهای JPDA [2] در ردیابی حالتی با دو یا چند مانور بررسی شده است. روش تطبیقی نیز برای ردیابی هدف چندگانه دارای مانور استفاده شده است [3]. در محیط متراکم هدف (مانند زیر آب)، الگوریتم ارتباط داده ها روش کلیدی است که به اندازه گیری های مرتبط با اهداف تعیین شده و تکنیک های مربوط به آن اعمال می شود نیز در بعضی مقالات عنوان شده است.

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} J_1(\eta) & \cdot \\ \cdot & J_2(\eta) \end{bmatrix} \quad (4)$$

که :

$$\eta_1 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad \text{و} \quad \eta_2 = \begin{bmatrix} \theta \\ \psi \end{bmatrix} \quad (5)$$



شکل ۱: مختصات بدنه ثابت و زمین ثابت [5]

## 2-2- مدل ریاضی فیلتر و روش ترکیب داده ها

در این بخش مدل ریاضی برای الگوریتم ردیابی هدف چندگانه بصورت زیر تعریف می شوند.

$$X(k+1) = F(k)X(k) + G(k)U(k) + V(k) \quad (6)$$

$$Y(k) = H(k)X(k) + W(k) \quad (7)$$

که  $X(k)$  بردار حالت ربات زیرآبی.

$Y(k)$ : بردار اندازه گیری.

$F(k)$ : ماتریس انتقال حالت.

$G(k)$ : ماتریس بهره هدف.

$U(k)$ : بردار ورودی ها.

$H(k)$ : ماتریس اندازه گیری ها.

$V(k)$ : نویز سیستم، با میانگین صفر و واریانس  $R(k)$ .

$W(k)$ : نویز اندازه گیری، با میانگین صفر و واریانس  $Q(k)$ ، که با  $V(k)$  ناهمبسته است.

در ردیابی اهداف چندگانه (MTT)، الگوریتم ترکیب، روش کلیدی برای محاسبه همبستگی بین اهداف اندازه گیری شده و اهداف موجود است. در این مقاله برای حل مساله ترکیب داده ها الگوریتم شبکه عصبی هاپفیلد رقابتی (CHNN) به اندازه گیری های هدف اعمال شده است. زمان استفاده از شبکه ترکیب داده

سراسری ردیابی را بوجود می آورد. از اینرو هر چه مدل AUV و محیط اطراف آن دقیق تر شبیه سازی شود استراتژی ردیابی پیشنهاد شده عملکرد خود را بهتر نشان خواهد داد. مشخصات فیزیکی وسیله زیر آبی استفاده شده در این مقاله به این شرح است:

شکل بدنه بصورت سیلندری در نظر گرفته شده است. دارای دو مجموعه باله می باشد که هرکدام مختصات ثابت خود را دارند، و می توانند حول محور  $y$  دوران کند.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی ربات زیر آبی

1444	جرم (kg)
3.5	طول بدنه (m)
0.7	قطر بدنه (m)
1.3978	حجم بدنه ( $m^3$ )

رفتار دینامیکی یک AUV را می توان توسط معادلات 6 درجه آزادی غیر خطی در دو مختصات بدنه ثابت و زمین ثابت توصیف کرد [5]. در حالت کلی AUV می تواند توسط معادله زیر نشان داده شود.

$$M \dot{v} + C(v)v + D(v_r)v_r + g(\eta) = \tau \quad (1)$$

که  $M = M_{RB} + M_A$  و  $C(v) = C_{RB}(v) + C_A(v)$  است. ماتریس های  $M_{RB}$  و  $C_{RB}(v)$  متناظر با ماتریس جرم بدنه صلب و ماتریس اثر پیچشی جسم صلب هستند.  $M_A$  و  $C_A(v)$  ماتریسهای جرم افزوده و اثر پیچشی افزوده هستند.  $D$  متناظر با نیروهای میرایی می باشد. برآیند نیروهای رانشی و جاذبه زمین توسط  $g(\eta)$  نمایش داده شده است.  $\tau$  بردار ورودیهای کنترلی است. بردار سرعتهای خطی و زاویه ای در مختصات بدنه ثابت توسط رابطه زیر نمایش داده می شود.

$$v = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T \quad (2)$$

رابطه بین سرعت های خطی و زاویه ای در مختصات بدنه ثابت توسط ماتریس ژاکوبین مانند زیر نشان داده می شود.

$$\dot{\eta} = J(\eta)v \quad (3)$$

که  $\eta = [x \ y \ z \ \varphi \ \theta \ \psi]^T$  است. ماتریس ژاکوبین به شکل زیر خواهد بود.

این موضوع بسیار مهم است که یکبار که برنده رقابتی اعمال شد. وقتی A برابر 1 است، B می تواند به سادگی بزرگتر از شعاع دروازه ۲، (مقدار ثابت متناظر) شود. با انجام اینکار شبکه از بدام افتادن در جواب نامناسب پرهیز خواهد کرد. با مقایسه نتیجه تابع هدف با تابع لایپانو از شبکه عصبی رقابتی در معادله (8) می توان فهمید:

$$I_{x,i} = \frac{-A}{2} d_{x,i} \quad (12)$$

$$T_{x,i,y,j} = -B \delta_{x,y} \quad (13)$$

### 3- تشخیص مانور و الگوریتم فیلتر کالمن دوگانه

اگر هدف شامل مانور ناگهانی باشد، سیستم باید تشخیص دهد و موقعیت را سرعت و بدرستی تخمین بزند. برای انجام اینکار فیلتر کالمن دوگانه در این مقاله استفاده شده است. بر اساس این روش، بیشترین شتاب تقریبی هدف در زمان واقعی تخمین زده می شود. از نتایج این تخمین برای الگوریتم ردیابی استفاده می کنیم و عملکرد ردیابی بهتر را بدست می آوریم. برای تخمین وضعیت مانور، سیستم دینامیکی ربات زیر آبی را بصورت زیر تعریف می کنیم.

مدل سیستم:

$$X(k+1) = F(k)X(k) + G(k)U(k) + V(k) \quad (14)$$

$$X_a(k+1) = F(k)X(k) + G(k)U_a(k) + V(k) \quad (15)$$

و مدل اندازه گیری بصورت زیر است.

$$Y(k) = H(k)X(k) + W(k), \quad (16)$$

$$Y_a(k) = H(k)X_a(k) + W(k). \quad (17)$$

دو مدل تخمین در سیستم ردیابی تعریف شده است. U(k) شتاب واقعی هدف و  $U_a(k)$  شتاب مفروض هستند. بر اساس الگوریتم زیر، وضعیت مانور تخمین زده می شود.

$$\hat{X}(k|k-1) = E[X(k)|Y^{k-1}, \{U(k)\}] \quad (18)$$

$$\hat{X}_a(k|k-1) = E[X(k)|Y^{k-1}, \{U_a(k)\}] \quad (19)$$

$$B(k) = \hat{X}_a(k|k-1) - \hat{X}(k|k-1) \quad (20)$$

$$\Delta U(k) = U_a(k) - U(k). \quad (21)$$

بر اساس معادلات فیلتر کالمن، تخمین خطا بصورت زیر بدست می آید.

ها، حالت  $V_{x,i}$  به عنوان وضعیت ترکیب بین X امین اندازه گیری رادار و i امین هدف در نظر گرفته می شود. "1" به معنی ترکیب و "0" به معنی عدم ترکیب است.

سپس تابع هدف که برای بدست آوردن اندازه گیری ها و ترکیب اهداف رادار با بهترین تصمیم است بصورت زیر تعریف می شود.

$$E = A \sum_{x=1}^n \sum_{i=1}^m d_{x,i} V_{x,i} + B \sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m V_{x,i} V_{y,j} \delta_{x,y} + C \sum_{i=1}^m \left( \sum_{x=1}^n V_{x,i} - 1 \right)^2 \quad (8)$$

$d_{x,i}$  فاصله بین i امین هدف صحیح و X امین اندازه گیری است. که به صورت زیر تعریف می شود.

$$d_{x,i} = \begin{cases} [\tau^T(k) S(k)^{-1} \tau(k)]^{1/2} & \text{if } x \neq i \text{ and } x > m \\ \infty & \text{if } x \neq i \text{ and } 1 \leq x \leq m \\ r & \text{if } x = i \end{cases} \quad (9)$$

که  $\tau(k) = Y(k) - H(k)\hat{X}(K|k-1)$  و  $S(k)$  ماتریس کواریانس جدید و  $\Gamma$  شعاع دروازه است.

بخش دوم در معادله 8 تلاش می کند تضمین کند که هر اندازه گیری می تواند تنها با یک هدف ترکیب شود. بخش سوم معادله شرطی را اعمال می کند که هر هدف یک و فقط یک اندازه گیری ترکیب شده دارد. پارامترهای C و B، A فاکتورهای مهمی در تابع هدف می باشند. برای کاهش بار تعیین مقادیر فاکتورهای وزنی، یک برنده رقابتی که همه بروز شدن ها را به عهده می گیرد به صورت زیر تعریف شده است.

$$V_{x,i} = \begin{cases} 1, & \text{if } U_{x,i} = \max\{U_{1,i}, \dots, U_{n,i}\} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

با اصلاح قوانین بروزرسانی، محدودیت حتمی که هر هدف باید با یک و فقط یک اندازه گیری ترکیب شود به صورت خودکار به نتایج ارزیابی شبکه اعمال می شود. همینطور قسمت سوم متعاقبا از تابع هدف حذف می شود. بنابراین تابع هدف بصورت زیر ساده شود.

$$E = A \sum_{x=1}^n \sum_{i=1}^m d_{x,i} v_{x,i} + B \sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m V_{x,i} V_{y,j} \delta_{x,y} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} K_a(k+1) &= P_a(k+1|k)(H(k+1)D(k+1))^T S_a^{-1}(k+1) \\ \Delta \hat{U}(k+1|k+1) &= \Delta \hat{U}(k+1|k) \\ + K_a(k+1)[\tilde{Z}_a(k+1) - H(k+1)\Delta \hat{U}(k+1|k)] \end{aligned} \quad (35)$$

در نهایت ماتریس کواریانس تخمین خطای به روز شده بصورت زیر است.

$$\begin{aligned} P_a(k+1|k+1) &= P_a(k+1|k) \\ - K_a(k+1)S_a(k+1)K_a^T(k+1) \end{aligned} \quad (36)$$

اگر هدف با سرعت ثابت حرکت کند، سیستم مدل اول را که با معادلات زیر تعریف می شود را انتخاب می کند.

$$X(k+1) = F(k)x(k) + V(k), \quad (37)$$

$$Y(k+1) = H(k)X(k+1) + W(k+1) \quad (38)$$

اگر فرآیند ردیابی بر اساس معادلات عمومی فیلتر کالمن باشد، اگر مانوری در هدف اتفاق بیافتد سیستم مدل دوم را که بصورت زیر تعریف شده است انتخاب می کند.

$$X(k+1) = F(k)X(k) + D(k)U(k) + V(k), \quad (39)$$

$$Y(k+1) = H(k)X(k+1) + W(k+1) \quad (40)$$

#### 4- پیاده سازی

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهاد شده، آن را پیاده سازی کرده و جوابهای بدست آمده را بررسی می کنیم. در زمان شبیه سازی نویز اندازه گیری و نقاط تصادفی با استفاده از یک فرایند تولید اعداد تصادفی بوجود آمده اند. داده های اندازه گیری شده که از هدف در حال حرکت بدست می آیند با خطای اندازه گیری جمع می شوند. نتیجه ردیابی اهداف چند گانه در شکل (2) به ازای موقعیت های مختلف نشان داده شده است.

در شبیه سازی، انحراف استاندارد برای نویز موقعیت سیستم 2 متر برای محورهای X و Y می باشد و انحراف اندازه گیری نویز موقعیت استاندارد 3 متر فرض شده است. بعلاوه انحراف استاندارد نویز سرعت 0.05 برابر میانگین سرعت در نظر گرفته شده است. و فرض می کنیم که تمام نویز ها بدون همبستگی باشند. الگوریتم فیلتر کالمن دوگانه را به همراه الگوریتم ترکیب داده ها CHNN برای شبیه سازی استفاده می کنیم. در حالیکه مقادیر  $A=1$  و  $B=r+1$  هستند و  $r$  شعاع دروازه می باشد.

$$\begin{aligned} B(k+1) &= X_a(k+1|k) - X(k+1|k) \\ &= F(k)X_a(k|k) + G(k)U_a(k) - F(k)X(k|k) - G(k)U(k) \\ &= F(k)[I - K(k)H(k)]B(k) + G(k)\Delta U(k) \end{aligned} \quad (22)$$

فرض کنید:

$$B(k) = D(k)\Delta U(k), D(k) = 0.$$

بنابراین:

$$D(k+1) = F(k)[I - K(k)H(k)]D(k) + G(k) \quad (23)$$

بر اساس فیلتر کالمن، اندازه گیری تولید شده بصورت زیر بدست می آید.

$$\tilde{Z}(k) = H(k)X(k) - H(k)\hat{X}(k|k-1) \quad (24)$$

$$\tilde{Z}_a(k) = H(k)X(k) - H(k)\hat{X}_a(k|k-1) \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \tilde{Z}_a(k) - \tilde{Z}(k) &= H(k)\hat{X}_a(k|k-1) - H(k)\hat{X}(k|k-1) \\ &= H(k)D(k)\Delta U(k). \end{aligned} \quad (26)$$

و بنابراین:

$$\tilde{Z}_a(k) = \tilde{Z}(k) + H(k)D(k)\Delta U(k) \quad (27)$$

معادله (26) مدل مشاهدات از  $\Delta U(k)$  است. در این سیستم فرض می کنیم همه نویزها گوسی باشند. بر اساس این فرض، الگوریتم تخمین وضعیت شتاب می تواند طبق مرجع [7] بصورت زیر مدل شود.

مدل وضعیت:

$$\Delta U(k+1) = \Delta U(k). \quad (28)$$

$$\tilde{Z}_a(k) = H(k)D(k)\Delta U(k) + \tilde{Z}(k). \quad (29)$$

$$\begin{aligned} P_a(k|k) &= E\{[\Delta U(k) - \Delta \hat{U}(k|k)] \\ &[\Delta U(k) - \Delta \hat{U}(k|k)]^T\} \end{aligned} \quad (30)$$

$$\Delta \tilde{U}(k+1|k) = \Delta U(k+1) - \Delta \tilde{U}(k+1|k) \quad (31)$$

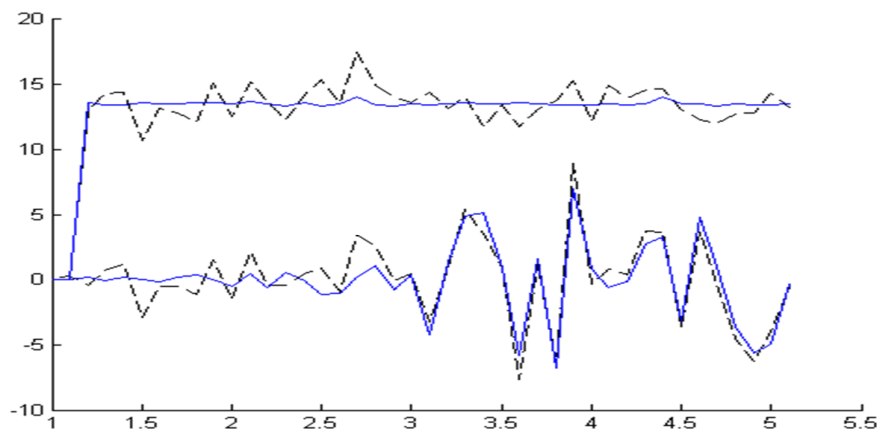
$$\begin{aligned} P_a(k+1|k) &= E[\Delta \tilde{U}(k+1|k)\Delta \tilde{U}^T(k+1|k)] \\ &= P_a(k|k) \end{aligned} \quad (32)$$

$$\hat{\tilde{Z}}(k+1|k) = H(k+1)D(k+1)\Delta \hat{U}(k+1|k) \quad (33)$$

$$S_a(k+1) = \text{cov}[\tilde{Z}_a(k+1|k)] \quad (34)$$

$$= [H(k+1)D(k+1)]$$

$$\begin{aligned} P_a(k+1|k)[H(k+1)D(k+1)]^T \\ + R_a(k+1) \end{aligned}$$



شکل 2: ردیابی دو ربات زیر آبی توسط فیلتر کالمن دوگانه

قادر است چند ربات زیر آبی در وضعیت های متفاوت را با عملکرد مناسبی ردیابی کند.

### مراجع:

- [۱] Bizup, S.S., and Brown, D.E., "Maneuver detection using the radar range rate measurment" IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, Vol ۴۰, ۲۰۰۴, pp.۳۳۰-۳۳۶.
- [۲] Puranik S., and Tugnit J.K., "Tracking of multiple maneuvering targets using multiscan JPDA and IMM filtering" IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, vol ۴۳, ۲۰۰۷, pp. ۲۳-۳۵.
- [۳] Chung, Y.N., Chou, P.H., Chen, H.T., and Chou, F.P., "A dynamic multiple sensor for radar maneuvering target tracking problems" Journal of Information Science and Engineering, Vol. ۲۳, ۲۰۰۷, pp ۱۰۳۳-۱۰۴۸.
- [۴] Chung, Y.N., Chou, P.H., yang, M.R., and Chen, H.T., "Multiple-target tracking with competitive hopfield neural network-based data association", IEEE transactions on Aerospace and Electrical Systems, Vol. ۴۳, ۲۰۰۷, pp. ۱۱۸۰-۱۱۸۸.
- [۵] Fossen, T.I., Guidance and Control of Ocean Vehicles. Wiley, New York, ۱۹۹۴
- [۶] Antoneli, Gianluca, "Underwater Robots", Second edition, Springer Tracts in Advanced Robotics, Volume ۲, ۲۰۰۵.
- [۷] Karsaz, Ali. and Khaloozadeh, Hamid. "An optimal two-stage algorithm for highly maneuvering targets tracking" Elsevier, Journal of Signal Processing, ۲۰۰۹. pp. ۵۲۲-۵۴۷.

تعداد باز گشت ها در هر مرحله 4 برابر تعداد اهداف فرض شده است. نتایج شبیه سازی ردیابی 2 هدف دارای مانور در شکل (2) نشان داده شده است.

بعد از اعمال 50 بار مونت کارلو خطای ردیابی موقعیت و سرعت، RMSE در جدول (2) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود الگوریتم فیلتر کالمن دوگانه مقدار خطای موقعیت و خطای سرعت کمی را نسبت به الگوریتم های دیگر دارد. می توان مشاهده کرد که الگوریتم پیشنهاد شده عملکرد مناسبی دارد و قادر است اهداف چندگانه را در موقعیت های مختلف بخوبی ردیابی کند.

جدول 2: نتایج شبیه سازی ردیابی دو هدف توسط فیلتر کالمن دوگانه

	خطای موقعیت	خطای سرعت
هدف اول	5.1	1.22
هدف دوم	3.57	1.3

## 5- نتیجه گیری

در این مقاله فیلتر کالمن دوگانه برای ردیابی چند ربات زیر آبی دارای مانور استفاده شد. بر اساس این روش وضعیت مانور می تواند در زمان واقعی تخمین زده شود. این روش شامل روش ترکیب داده CHNN و الگوریتم فیلتر کالمن دوگانه است. مزیت این روش ردیابی اینست که یک روش بازگشتی ساده می باشد که می تواند مساله مانور چند گانه و مساله ترکیب داده ها را بسرعت حل کند. بر اساس نتایج شبیه سازی این الگوریتم