

# ردیابی چندهدفی چندسنسوری غیرمتمرکز و همکارانه با اندازه‌گیری غیرهمزمان سمت

علیرضا جلالی‌پور<sup>۱</sup>، ریحانه کاردهی مقدم<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> گروه برق، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران jalalipoor@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه برق، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران rkardehi.moghaddam@gmail.com

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۳۰

ویرایش: ۱۳۹۸/۱۱/۰۲

دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۱۱

**چکیده:** ردیابی هدف فقط با اندازه‌گیری زاویه سمت، یک مسئله چالش‌برانگیز با کاربردهای فراوان در حوزه‌های نظامی و تجاری می‌باشد. در ردیابی سمت به تنهایی بصورت چندهدفی چندسنسوری توزیع شده، سنسورها از یکدیگر فاصله داشته اما با استفاده از تجهیزات مخابراتی با هم تبادل داده می‌نمایند. این سیستم، علاوه بر مزایای عمومی سیستم‌های توزیع شده، شامل این ویژگی کاربردی است که در صورت وجود فاصله مناسب بین سنسورها، حالت اهداف رویت‌پذیر بوده و انجام مانور توسط حسگرها ضرورت نخواهد داشت. با توجه به اهمیت و کاربرد این مسئله، در این مقاله برای اولین بار ردیابی سمت به تنهایی چندهدفی چندسنسوری با معماری غیرمتمرکز و با اندازه‌گیری‌های ناهمزمان ارائه شده است. در این تحقیق، با کمک گرفتن از ایده اندازه‌گیری مرکب و با لحاظ نمودن زمان اندازه‌گیری‌ها در محاسبات، ضمن غلبه بر ناهمزمانی اندازه‌گیری‌ها، اثرات غیرخطی در معادله اندازه‌گیری حذف شده است. همچنین از فیلترینگ مبتنی بر استراتژی پخش به منظور بهره‌برداری از اطلاعات عامل‌های سنسوری همسایه جهت بهبود تخمین‌ها استفاده شده است. شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد که سیستم طراحی شده، می‌تواند به خوبی اهداف را تشخیص داده و با دقت قابل قبولی ردیابی نماید.

**کلمات کلیدی:** ردیابی هدف با اندازه‌گیری سمت به تنهایی، سیستم‌های چندعامله، سیستم‌های غیرمتمرکز، کنترل همکارانه، فیلترهای مبتنی بر استراتژی‌های پخش.

## Decentralized and Cooperative Multi-Sensor Multi-Target Tracking With Asynchronous Bearing Measurements

Alireza Jalalipoor, Reihane Kardehi Moghaddam

**Abstract:** Bearings only tracking is a challenging issue with many applications in military and commercial areas. In distributed multi-sensor multi-target bearings only tracking, sensors are far from each other, but are exchanging data using telecommunication equipment. In addition to the general benefits of distributed systems, this tracking system has another important advantage: if the sensors are sufficiently spaced apart, the target state is observable and the maneuver is not necessary by sensors. In this work, Multi-sensor multi-target bearings only tracking with decentralized architecture and asynchronous measurements is newly proposed. In this study, with the help of the idea of composite measurements and taking into account the time of measurements in the calculations, while overcoming the asynchronous of the measurements, the nonlinear effects in the measurement equation are also eliminated. Also, diffusive filtering is used to exploit the information of neighboring sensor agents to improve the estimates. The simulations show that the system designed in this research can well detect targets and track them with acceptable accuracy.

**Keywords:** Bearings-only Tracking, Multi-Agent Systems, Decentralized Systems, Cooperative Control, Diffusive Filters.

## ۱- مقدمه

تحلیل حرکت هدف صرفاً با اندازه‌گیری زاویه سمت هدف که به ردیابی سمت به تنهایی<sup>۱</sup> معروف شده است، یکی از مسائل کلاسیک در حوزه ردیابی است که از سال ۱۹۴۷ توسط استنسفیلد [۱] آغاز شده و هنوز هم از نظر تئوری و هم از نظر عملی، مورد توجه محققین می‌باشد. از کاربردهای نظامی این مسئله چالش برانگیز می‌توان به ردیابی هدف در زیر آب با استفاده از سونار غیرفعال<sup>۲</sup> و از کاربردهای غیرنظامی آن به ردیابی هواپیماها در مراقبت هوایی اشاره نمود [۵-۲].

در مسائل ردیابی سمت به تنهایی، معادله اندازه‌گیری در دستگاه مختصات کارترین تابعی غیرخطی از موقعیت هدف است، لذا با یک مسئله فیلترینگ غیرخطی روبرو هستیم [۶]. در صورت ثابت بودن سنسور، فقط با اندازه‌گیری سمت هدف نمی‌توان مکان آن را تعیین نمود زیرا متغیرهای حالت هدف هنگامی رویت‌پذیر می‌شوند که سکوی حامل سنسور، متحرک بوده و میزان مانور آن از مانور هدف بیشتر باشد [۷]. تحقیقات در این زمینه هنوز هم ادامه دارد. به عنوان مثال، مرجع [۸] از بین رویکردهای موجود، رویکرد بیشترین شباهت<sup>۳</sup> را برای حل این مسئله پیشنهاد کرده است. همچنین مرجع [۹] به طراحی مانور بهینه مشاهده‌گر پرداخته است.

در ردیابی چندهدفی چندسنسوری، اندازه‌گیری‌های چندین سنسور طوری با یکدیگر ترکیب می‌شوند که خط‌سیر<sup>۴</sup> اهداف ردیابی شده نسبت به حالت یک سنسور، بطور قابل توجهی بهتر خواهند بود [۱۰]. با توسعه شبکه‌های حسگر بیسیم، سیستم‌های ردیابی چندهدفی چندسنسوری توزیع شده مورد توجه محققین قرار گرفته است. در ردیابی سمت به تنهایی چندهدفی چندسنسوری توزیع شده، سنسورها از هم فاصله داشته اما ارتباط داده‌ای با یکدیگر ندارند. این سیستم‌ها علاوه بر مزایای کلی سیستم‌های توزیع شده، دارای این ویژگی کاربردی می‌باشند که اگر سنسورها به نحو مناسبی از یکدیگر فاصله داشته باشند، نیاز به انجام مانور توسط سکوهاى سنسوری برطرف می‌گردد [۲].

برای سیستم‌های ردیابی توزیع شده، از معماری‌های متمرکز<sup>۵</sup>، غیرمترکز<sup>۶</sup> و ترکیبی<sup>۷</sup> استفاده می‌شود. در ساختار متمرکز، داده‌های تمام سنسورها برای پردازش به یک مرکز تلفیق داده<sup>۸</sup> سراسری ارسال می‌شوند. در معماری غیرمترکز، هر سکو داده‌های دریافتی از سنسورهای محلی خودش را پردازش نموده و با سکوهاى مجاور نیز تبادل اطلاعات می‌نماید. معماری ترکیبی یا سلسله مراتبی، تلفیقی از ساختارهای متمرکز و غیرمترکز می‌باشد. اگرچه از نظر بهینه بودن، معماری متمرکز نسبت به معماری غیرمترکز دارای برتری می‌باشد، اما به زیرساخت‌های قوی‌تری برای جمع‌آوری اطلاعات و پردازش آنها در مرکز تلفیق داده سراسری نیاز دارد. لذا در بسیاری از کاربردها، معماری غیرمترکز ترجیح داده می‌شود.

اغلب مقالات ارائه شده در حوزه ردیابی سمت به تنهایی توزیع شده، از ساختارهای متمرکز یا سلسله مراتبی استفاده نموده‌اند و به معماری غیرمترکز کمتر پرداخته شده است.

بسیاری از تحقیقات انجام شده در زمینه تخمین توزیع شده، فرض همزمانی اندازه‌گیری‌ها را در نظر می‌گیرند. اما در واقعیت با توجه به عملکرد مستقل سنسورها، تأخیر انتقال داده، احتمال از دست رفتن بسته‌های اطلاعاتی هنگام انتقال و ... فرض همزمانی داده‌ها صحیح نخواهد بود. تعداد معدودی از مقالات ارائه شده در زمینه ردیابی سمت به تنهایی توزیع شده، ناهمزمانی اندازه‌گیری‌ها را در نظر گرفته‌اند. در مرجع [۱۱] حل مسئله ردیابی چندهدفی چندسنسوری با اندازه‌گیری سمت به تنهایی ناهمزمان با معماری متمرکز مورد توجه قرار گرفته و یک الگوریتم بازگشتی ارائه شده است. در مرجع [۱۲] نیز یک الگوریتم متمرکز برای اندازه‌گیری‌های غیرهمزمان سنسورهای سمت به تنهایی ارائه شده است.

استراتژی‌های مختلفی از جمله استراتژی‌های افزایشی<sup>۹</sup>، اجماع<sup>۱۰</sup> و پخش<sup>۱۱</sup> برای همکاری عامل‌ها و نحوه تبادل اطلاعات در شبکه پیشنهاد شده است [۱۳]. در مرجع [۱۴] تلاش گردیده است که حجم اطلاعات موردنیاز جهت تبادل بین گره‌ها کاهش یابد. یکی از راهکارهای مورد استفاده، تبادل اطلاعات با گره‌های انتخاب شده بصورت تصادفی بجای انتشار سراسری در شبکه است. عموماً از استراتژی اجماع برای پیاده‌سازی رفتار هماهنگ و همکارانه در سیستم‌های شبکه‌ای استفاده می‌شود. مرجع [۱۵] به بررسی و تحلیل الگوریتم‌های اجماع در سیستم‌های چندعامله پرداخته است. در سال‌های اخیر، فیلترهای توزیع شده مبتنی بر اجماع مورد توجه قرار گرفته است. مرجع [۱۶] از فیلتر کالمن نمونه‌بردار مبتنی بر اجماع میانگین برای حل مسئله ردیابی سمت به تنهایی در فضای سه بعدی استفاده نموده است. در فیلترهای توزیع شده مبتنی بر اجماع، لازم است که بین دو اندازه‌گیری متوالی، مرحله اجماع به همگرایی برسد؛ اما در سیستم‌های بزرگ و گسترده به دلایلی مانند تأخیر شبکه و اتصالات متناوب ممکن است این کار قابل انجام نباشد [۱۷]. مرجع [۳] از فیلتر ذره‌ای توزیع شده برای حل مسئله ردیابی سمت به تنهایی استفاده نموده و تلاش کرده است که سربار ناشی از تکرارهای لازم برای همگرایی الگوریتم اجماع کاهش داده شود. مرجع [۱۸] با مقایسه استراتژی‌های همکاری برای تخمین توزیع شده، نشان داده است که الگوریتم‌های پخش عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم‌های اجماع دارند. در مرجع [۱۷] یک چارچوب برای تخمین غیرخطی چندسنسوری توزیع شده با استفاده از فیلتر ذره‌ای مبتنی بر استراتژی پخش ارائه شده است.

دو پیکربندی کاربردی برای حل مسائل تخمین چندسنسوری وجود دارد. در پیکربندی اول، اندازه‌گیری‌های تمام سنسورها مستقیماً در فرایند

7 Hybrid Architecture

8 Data Fusion Centre

9 Incremental Strategy

10 Consensus Strategy

11 Diffusion Strategy

1 Bearings-Only Tracking

2 Passive

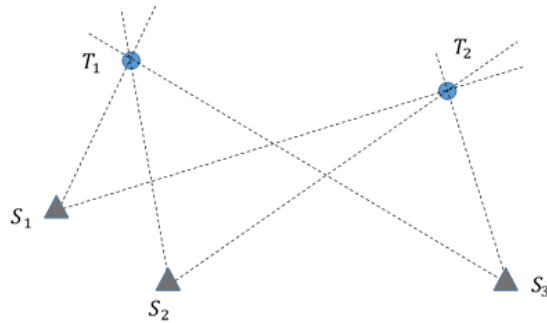
3 Maximum Likelihood (ML)

4 Track

5 Centralized Architecture

6 Decentralized Architecture

با عامل های همسایه خود ارتباط دارد، لذا با تشکیل یک شبکه سنسوری توزیع شده، چارچوب مناسبی برای تخمین غیرمتمرکز و همکارانه، بدون نیاز به مرکز تلفیق داده فراهم می شود. با توجه به عملکرد مستقل عامل ها، اندازه گیری ها ناهمزمان می باشند. هدف از حل این مسئله، تخمین سینماتیک (موقعیت و سرعت) اهداف می باشد. در شکل ۱ یک سناریوی نمونه که شامل سه عامل سنسوری و دو هدف می باشد، مشاهده می گردد.



شکل ۱: یک سناریوی نمونه ردیابی سمت به تنهایی توزیع شده

## ۲-۲ فرضیات مسئله

در مسئله موردنظر، فرض شده است که هر عامل می تواند با استفاده از سیستم موقعیت یاب جهانی<sup>۴</sup> یا سیستم ناوبری اینرسی<sup>۵</sup>، موقعیت و سرعت خود را بطور دقیق تعیین نماید. اما اندازه گیری سمت اهداف دارای خطا می باشد که بصورت نویز سفید گوسی با میانگین صفر و انحراف معیار حداکثر ۵ درجه در نظر گرفته شده است. اهداف، بدون مانور بوده اما عامل ها با حداکثر نرخ چرخش ۲ درجه بر ثانیه می توانند مانور داشته باشند. حداکثر سرعت اهداف و عامل ها ۳۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. برای هر عامل، دید ۳۶۰ درجه در نظر گرفته شده است. حداکثر فاصله قابل اندازه گیری توسط پارامتری به نام برد اندازه گیری تعیین می گردد. حداکثر فاصله ممکن جهت ارتباط با عامل های اطراف به مقداری تحت عنوان برد ارتباطی محدود شده است. با توجه به محدودیت پهنای باند ارتباطی در دنیای واقعی، باید حداقل داده ها بین عامل ها رد و بدل شود. همچنین کاهش حجم محاسبات محلی مورد نیاز در هر عامل مدنظر قرار می گیرد تا استفاده از الگوریتم های طراحی شده در کاربردهای واقعی امکان پذیر گردد.

## ۳- روش انجام تحقیق

### ۱-۳ مدل محیط

محیط سیستم، فضایی دوبعدی دربرگیرنده تمام موجودیت ها شامل سنسورها و اهداف می باشد. مشخصات تمام موجودیت ها از جمله مشخصات مکانی و حرکتی آنها در مدل محیط ثبت گردیده و در زمان شبیه سازی سیستم، بطور مداوم بروز رسانی می شود. دو کارکرد اصلی برای مدل محیط در نظر گرفته شده است. کارکرد اول، مدل سازی فرایند

فیلترینگ مورد استفاده قرار می گیرند. در پیکربندی دوم، ابتدا تمام اندازه گیری ها از یک زمان مشخص، با یکدیگر ترکیب شده و یک اندازه گیری کامل تر را می سازند که به آن اندازه گیری مرکب<sup>۱</sup> گفته می شود [۱۹]. مرجع [۲۰]، روابط مناسبی جهت محاسبه اندازه گیری مرکب برای مسئله ردیابی سمت به تنهایی با ساختار متمرکز و اندازه گیری های همزمان ارائه نموده است. در مرجع [۲۱] دو روش برای تشکیل اندازه گیری مرکب در سیستم ردیابی سمت به تنهایی متمرکز با سنسورهای ثابت و مشاهدات ناهمزمان ارائه شده است. مرجع [۱۹] روش اول ارائه شده در مرجع [۲۱] را تکمیل نموده است.

در این تحقیق، ردیابی اهداف با استفاده از تعدادی عامل سنسوری هوشمند که فقط قادر به اندازه گیری سمت اهداف می باشند، مدنظر قرار گرفته است. اگرچه در تحقیقات منتشر شده ابعاد مختلف این مسئله مورد بررسی قرار گرفته است اما هیچکدام از آنها به حل مسئله ردیابی سمت به تنهایی بصورت چندهدفی چندسنسوری با معماری غیرمتمرکز و اندازه گیری های ناهمزمان که در این مقاله ارائه گردیده است، نپرداخته اند. در این پژوهش، پس از وابسته سازی داده<sup>۲</sup>، ایده اندازه گیری مرکب ارائه شده توسط مرجع [۱۹]، با انجام برخی اصلاحات لازم، برای سیستم غیرمتمرکز موردنظر در این تحقیق بکارگیری شده است. در فرایند مدیریت خط سیر اهداف، از ایده انتخاب مناسب ترین هدف از بین یک مجموعه اهداف فرضی، برای راه اندازی خط سیرهای جدید استفاده شده است. بکارگیری روش اندازه گیری مرکب موجب خطی شدن معادله اندازه گیری می شود، لذا از فیلتر کالمن توزیع شده مبتنی بر استراتژی پخش برای تخمین حالت اهداف استفاده شده است. مانور حرکتی عامل ها نیز به نحوی تعیین می گردد که ضمن حفظ اتصال شبکه و تعقیب اهداف، سرعت و کیفیت ردیابی بهبود یابد.

در ادامه، ابتدا مسئله موردنظر تشریح گردیده و روش اجرای تحقیق به تفصیل شرح داده می شود. بعد از آن، نتایج بدست آمده در شبیه سازی های انجام شده، ارائه گردیده و مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در انتها نیز ضمن ارائه نتیجه گیری، پیشنهاداتی جهت ادامه تحقیق مطرح می گردد.

## ۲- تشریح مسئله موردنظر

### ۱-۲ سیستم مورد مطالعه

در این تحقیق، طراحی یک سیستم توزیع شده برای ردیابی اهداف متحرک بدون مانور در فضای دوبعدی با استفاده از تعدادی عامل متحرک خودمختار (مانند ربات یا پهپاد<sup>۳</sup>) مدنظر قرار گرفته است. این عامل ها که فقط قادر به اندازه گیری سمت اهداف می باشند، بطور مستقل محیط را پایش نموده و بصورت محلی اندازه گیری ها را پردازش می نمایند. هر عامل

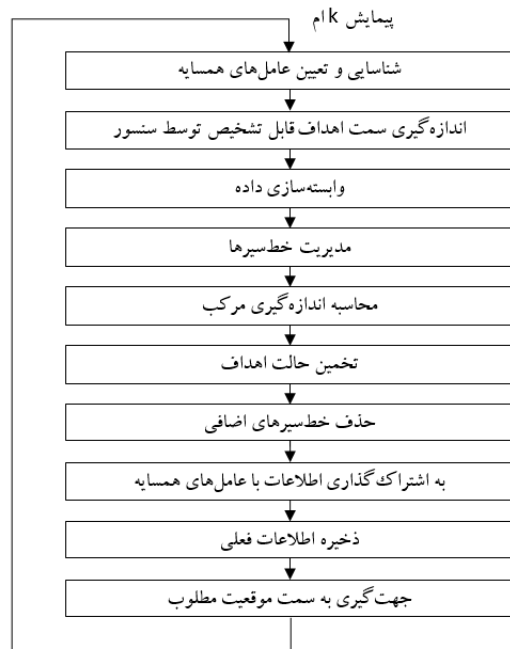
<sup>۴</sup> Global Positioning System (GPS)

<sup>۵</sup> Inertial Navigation System (INS)

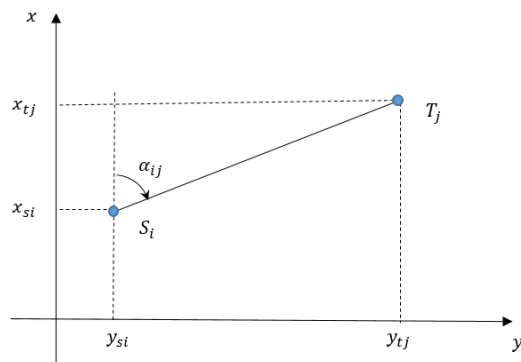
<sup>۱</sup> Composite Measurement

<sup>۲</sup> Data Association

<sup>۳</sup> Unmanned Aerial Vehicle (UAV)



شکل ۲: فلوچارت کلی برنامه عامل‌های سنسوری



شکل ۳: هندسه مسئله ردیابی سمت به تنهایی در دستگاه مختصات کارترین  
مدل اندازه‌گیری بصورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$z_{ij}(t_k) = h(T_j(t_k), S_i(t_k)) + w_{ij}(t_k) \quad (3)$$

که  $z_{ij}(t_k)$  اندازه‌گیری سمت هدف  $z$  ام توسط عامل  $i$  ام در  $t_k$  است و  $w_{ij}(t_k)$  نویز اندازه‌گیری سنسور  $i$  ام برای هدف  $z$  ام در  $t_k$  می‌باشد. نویز اندازه‌گیری سنسور  $i$  ام، دارای توزیع گوسی با میانگین صفر و واریانس  $R_i$  در نظر گرفته شده است. همچنین:

$$h(T_j(t_k), S_i(t_k)) = \alpha_{ij}(t_k) = \tan^{-1} \left( \frac{y_{tj}(t_k) - y_{si}(t_k)}{x_{tj}(t_k) - x_{si}(t_k)} \right) \quad (4)$$

فلوچارت فرایند وابسته‌سازی اندازه‌گیری‌ها به خط‌سیرهای موجود در شکل ۴ آورده شده است. در این تحقیق، روش نزدیک‌ترین همسایه برای وابسته‌سازی داده، انتخاب شده و توسط الگوریتم تخصیص منابع مانکرس<sup>۱</sup> پیاده‌سازی شده است.

اندازه‌گیری سمت اهداف موجود در محیط نسبت به عامل‌ها و با توجه به برد اندازه‌گیری آنها می‌باشد. کارکرد دوم محیط، ایفای نقش رسانه انتقال اطلاعات بیسیم بین عامل‌ها می‌باشد. محیط از دیدگاه انتقال سیگنال مخابراتی، ایده‌آل و بدون نویز در نظر گرفته شده و احتمال خرابی بسته‌های داده صفر است اما برد ارتباطی محدود می‌باشد. هنگامی که یک عامل، اطلاعات خود را در محیط منتشر می‌کند، این اطلاعات توسط محیط به عامل‌هایی که قادر به تبادل داده با عامل مذکور باشند انتقال داده می‌شود.

### ۳-۲ مدل اهداف

اهداف بصورت اشیاء متحرک ساده با حرکت مستقیم الخط یکنواخت در دستگاه مختصات کارترین مدل‌سازی می‌شوند. بردار موقعیت آنها در زمان شبیه‌سازی سیستم، بطور مداوم و در هر پیمایش با گام زمانی بروز رسانی می‌شود.

### ۳-۳ مدل عامل‌ها

عامل‌های سنسوری، موجودیتهای هوشمندی هستند که با حسگرهای خود، اهداف موجود در محیط را تشخیص داده و الگوریتم‌های محاسباتی موردنیاز را اجرا می‌کنند. در زمان شبیه‌سازی سیستم، بردار موقعیت و بردار سرعت عامل‌ها نیز بطور مداوم و در هر گام زمانی بروز رسانی می‌شود. همچنین برنامه عامل که وظیفه تامین هوشمندی را بر عهده دارد، در هر پیمایش شبیه‌سازی اجرا می‌شود. بخش اصلی حل مسئله در این تحقیق، طراحی ساختار کارکردی برنامه عامل‌ها و الگوریتم‌های محاسباتی آنها می‌باشد. فلوچارت کلی برنامه عامل در شکل ۲ آورده شده است.

اولین مرحله در برنامه عامل، شناسایی و تعیین عامل‌های همسایه است. اطلاعات دریافتی از عامل‌های همسایه، برای مدت زمان معینی در حافظه عامل نگهداری شده و سپس از حافظه حذف می‌شوند. به منظور تعیین عامل‌های همسایه، شماره عامل‌هایی که اطلاعات دریافتی از آنها در حافظه موجود می‌باشد، استخراج می‌گردد.

موقعیت عامل  $i$  ام و هدف  $z$  ام در دستگاه مختصات کارترین دو بعدی در شکل ۳ نشان داده شده است. موقعیت عامل در لحظه  $t_k$  معلوم فرض می‌شود:

$$S_i(t_k) = \begin{bmatrix} x_{si}(t_k) \\ y_{si}(t_k) \end{bmatrix} \quad (1)$$

موقعیت هدف  $z$  ام در لحظه  $t_k$  بصورت زیر نشان داده می‌شود:

$$T_j(t_k) = \begin{bmatrix} x_{tj}(t_k) \\ y_{tj}(t_k) \end{bmatrix} \quad (2)$$

<sup>1</sup> Munkres Algorithm

که  $\alpha_{zm}$  زاویه سمت اندازه گیری شده و  $\alpha_{tn}$  مقدار تخمین زده شده برای سمت هدف در زمان اندازه گیری  $\alpha_{zm}$  است.

هدف موقتی که بیشترین انطباق را با اندازه گیری ها داشته باشد، انتخاب شده و یک تخمین گر برای آن راه اندازی می شود. در پیمایش های بعدی شبیه سازی، برای این هدف نیز فرایند فیلترینگ و تخمین حالت انجام خواهد شد.

سه وضعیت مختلف برای اهداف تخمین زده شده، تعریف شده است: در حال بررسی<sup>۱</sup>، ردیابی شده<sup>۲</sup> و گم شده<sup>۳</sup>. وضعیت اهداف جدید، در حال بررسی در نظر گرفته می شود. پس از گذشت مدت زمانی معینی از شروع فیلترینگ، وضعیت هدف به ردیابی شده تغییر می یابد. اگر به اندازه مدت زمان معین دیگری، از آخرین اندازه گیری اختصاص یافته به یک هدف با وضعیت ردیابی شده بگذرد، وضعیت آن به گم شده تغییر خواهد یافت. در این صورت، اندازه گیری پیش بینی شده بر مبنای تخمین بردار حالت هدف، به جای اندازه گیری سنسور مورد استفاده قرار می گیرد. اگر مدت زیادی از آخرین اندازه گیری تخصیص داده شده به یک هدف با هر وضعیتی بگذرد، آن هدف از لیست اهداف تخمین زده شده حذف خواهد شد.

پس از وابسته سازی داده، اندازه گیری های مربوط به هر هدف مشخص شده است، لذا برای هر هدف یک اندازه گیری مرکب محاسبه می گردد. موقعیت عامل در  $t_k$  بصورت زیر می باشد:

$$S(t_k) = \begin{bmatrix} x_s(t_k) \\ y_s(t_k) \end{bmatrix} \quad (9)$$

بردار حالت هدف در  $t_k$  بصورت زیر است:

$$X(t_k) = \begin{bmatrix} x(t_k) \\ y(t_k) \\ \dot{x}(t_k) \\ \dot{y}(t_k) \end{bmatrix} \quad (10)$$

اندازه گیری سنسور در لحظه  $t_k$  بصورت زیر می باشد:

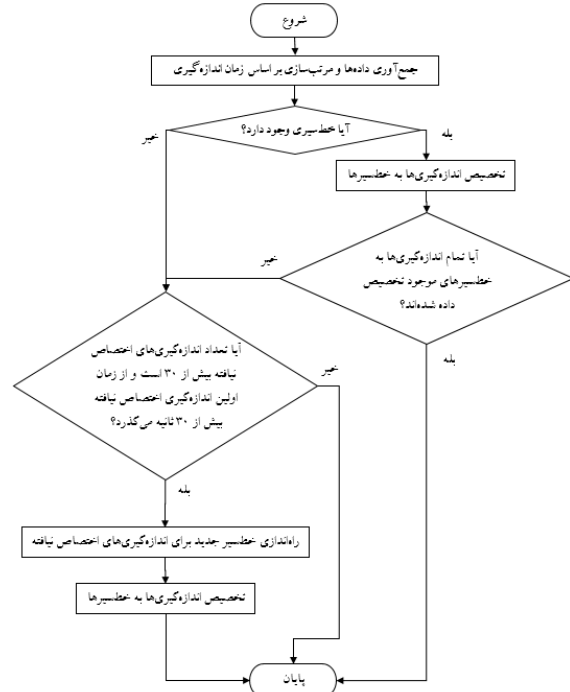
$$z(t_k) = h(X(t_k), S(t_k)) + w(t_k) \quad (11)$$

که  $w(t_k)$  نویز اندازه گیری سنسور در لحظه  $t_k$  می باشد و دارای توزیع گوسی با میانگین صفر و واریانس  $R_k$  در نظر گرفته می شود. در هر زمان، با توجه به منبع اندازه گیری، از واریانس سنسور مربوطه استفاده خواهد شد. همچنین:

$$h(X(t_k), S(t_k)) = \alpha(t_k) = \tan^{-1} \left( \frac{y(t_k) - y_s(t_k)}{x(t_k) - x_s(t_k)} \right) \quad (12)$$

تعداد کل اندازه گیری ها  $M$  در نظر گرفته شده است. اندازه گیری مرکب، تخمین بردار حالت هدف در لحظه مشخصی مانند  $t_f$  یعنی  $\hat{X}(t_f)$  می باشد که برای محاسبه آن، از روش تخمین حداکثر شباهت استفاده شده است. تابع چگالی احتمال مجموعه تمام اندازه گیری ها ( $Z$ ) به شرط  $X(t_f)$ ، به عنوان تابع درستنمایی در نظر گرفته می شود:

$$\Lambda[X(t_f); Z] \triangleq p[Z | X(t_f)] = \prod_k p[z(t_k) | X(t_f)] \quad (13)$$



شکل ۴: فلوچارت فرایند وابسته سازی داده

هزینه تخصیص اندازه گیری  $i$ ام به هدف  $j$ ام بصورت زیر تعریف شده است:

$$cost_{ij} = K_1 (1 - e^{K_2 (\gamma_{ij})^2}) \quad (5)$$

که  $K_1$  و  $K_2$  ضرایب ثابت می باشند. همچنین:

$$\gamma_{ij} = \hat{\alpha}_{tj} - \alpha_{zi} \quad (6)$$

که  $\alpha_{zi}$  زاویه سمت اندازه گیری شده و  $\hat{\alpha}_{tj}$  مقدار تخمین زده شده برای زاویه سمت هدف در زمان اندازه گیری  $\alpha_{zi}$  است.

برای راه اندازی خط سیر جدید، ابتدا تعدادی هدف موقت با پارامترهای تصادفی به عنوان نامزد برای خط سیر جدید تولید می شوند. فاصله این اهداف نسبت به محل اندازه گیری، نمونه هایی تصادفی از توزیع یکنواخت در برد اندازه گیری سنسور می باشند. زاویه سمت این اهداف، نمونه های تصادفی از توزیع گوسی حول مقدار اندازه گیری شده با انحراف معیار سنسور مربوطه انتخاب می شوند. کورس اهداف نیز نمونه هایی تصادفی از توزیع یکنواخت در بازه صفر تا  $360^\circ$  درجه می باشند.

در مرحله بعدی، میزان انطباق هر کدام از اهداف موقت با تمام اندازه گیری های اختصاص نیافته تعیین می گردد. تابع انطباق بصورت زیر تعریف شده است:

$$Congruity_{nm} = K_1 (1 - e^{K_2 (\zeta_{nm})^2}) \quad (7)$$

که  $n$  اندیس هدف موقت مورد نظر،  $m$  اندیس اندازه گیری،  $K_1$  و  $K_2$  ضرایب ثابت می باشند. همچنین:

$$\zeta_{nm} = \hat{\alpha}_{tn} - \alpha_{zm} \quad (8)$$

<sup>3</sup> Lost

<sup>1</sup> Query

<sup>2</sup> Track

بنابراین تخمین حداکثر شباهت برابر خواهد بود با:

$$\hat{X}_{ML} = \operatorname{argmax}_{X(t_f)} \Lambda[X(t_f); Z] = \operatorname{argmin}_{X(t_f)} \lambda[X(t_f); Z] \quad (14)$$

که  $\lambda(X)$  تابع درستمایی لگاریتمی منفی می باشد:

$$\lambda(X) = -\ln \Lambda(X) \quad (15)$$

با توجه به فرض گوسی بودن سیستم، داریم:

$$\lambda(X) = \frac{1}{2} \times \sum_k [z(t_k) - h(X(t_k), S(t_k))]^T (R_k)^{-1} [z(t_k) - h(X(t_k), S(t_k))] \quad (16)$$

ماتریس  $F$  بصورت زیر تعریف می شود:

$$F(t_k, t_f) \triangleq \begin{bmatrix} 1 & 0 & (t_k - t_f) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & (t_k - t_f) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

می توان نوشت:

$$X(t_k) = F(t_k, t_f) X(t_f) \quad (18)$$

بردار اندازه گیری انباشته شده، بصورت زیر تعریف می شود:

$$Z \triangleq \begin{bmatrix} z(t_1) \\ z(t_2) \\ \vdots \\ z(t_M) \end{bmatrix} \quad (19)$$

می توان نوشت:

$$\begin{bmatrix} h(X(t_1), S(t_1)) \\ h(X(t_2), S(t_2)) \\ \vdots \\ h(X(t_M), S(t_M)) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h(F(t_1, t_f) X(t_f), S(t_1)) \\ h(F(t_2, t_f) X(t_f), S(t_2)) \\ \vdots \\ h(F(t_M, t_f) X(t_f), S(t_M)) \end{bmatrix} \quad (20)$$

بردار اندازه گیری انباشته پیش بینی شده برای  $\hat{X}(t_f)$  بصورت زیر

تعریف می شود:

$$\bar{h}(\hat{X}(t_f)) \triangleq \begin{bmatrix} h(F(t_1, t_f) \hat{X}(t_f), S(t_1)) \\ h(F(t_2, t_f) \hat{X}(t_f), S(t_2)) \\ \vdots \\ h(F(t_M, t_f) \hat{X}(t_f), S(t_M)) \end{bmatrix} \quad (21)$$

در صورت خطی سازی تابع  $h$  حول  $\hat{X}(t_f)$  خواهیم داشت:

$$\alpha_k \triangleq \alpha(t_k) = h(F(t_k, t_f) \hat{X}(t_f), S(t_k)) = H_k \hat{X}(t_f) \quad (22)$$

که  $H_k$  ژاکوبین تابع  $h$  می باشد:

$$H_k = \begin{bmatrix} \frac{\partial \alpha_k}{\partial x} & \frac{\partial \alpha_k}{\partial y} & \frac{\partial \alpha_k}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial \alpha_k}{\partial \dot{y}} \end{bmatrix} \quad (23)$$

ماتریس  $H$  بصورت زیر تعریف می شود:

$$H \triangleq \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \vdots \\ H_M \end{bmatrix} \quad (24)$$

ماتریس  $R$  به فرم زیر تعریف می گردد:

$$R = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_M \end{bmatrix} \quad (25)$$

برای بیشینه کردن تابع درستمایی از الگوریتم کمترین مربعات بازگشتی استفاده می شود و تخمین فعلی بردار حالت هدف، به عنوان مقدار اولیه در نظر گرفته می شود. بعد از تکرار  $J$  ام، تخمین حالت هدف (اندازه گیری مرکب) بصورت زیر خواهد بود:

$$\hat{X}^{j+1} = \hat{X}^j + [(H^j)^T R^{-1} H^j]^{-1} (H^j)^T R^{-1} [Z - \bar{h}(\hat{X}^j)] \quad (26)$$

برای خطی سازی تابع  $h$  حول  $\hat{X}(t_f)$  و محاسبه  $H_k$ ، باید مشتقات  $\alpha_k$  نسبت به  $x(t_f)$ ،  $y(t_f)$ ،  $\dot{x}(t_f)$  و  $\dot{y}(t_f)$  محاسبه شوند. داریم:

$$\alpha_k = \tan^{-1} \left( \frac{y(t_f) + (t_k - t_f) \dot{y}(t_f) - y_s(t_k)}{x(t_f) + (t_k - t_f) \dot{x}(t_f) - x_s(t_k)} \right) \quad (27)$$

تعریف می شود:

$$\Delta x_s \triangleq x(t_f) + (t_k - t_f) \dot{x}(t_f) - x_s(t_k) \quad (28)$$

و:

$$\Delta y_s \triangleq y(t_f) + (t_k - t_f) \dot{y}(t_f) - y_s(t_k) \quad (29)$$

بنابراین:

$$\frac{\partial \alpha_k}{\partial x} = \frac{-\Delta y_s}{\Delta x_s^2 + \Delta y_s^2} \quad (30)$$

به روش مشابه:

$$\frac{\partial \alpha_k}{\partial y} = \frac{\Delta x_s}{\Delta x_s^2 + \Delta y_s^2} \quad (31)$$

همچنین:

$$\frac{\partial \alpha_k}{\partial \dot{x}} = \frac{-\Delta y_s}{\Delta x_s^2 + \Delta y_s^2} (t_k - t_f) = (t_k - t_f) \frac{\partial \alpha_k}{\partial x} \quad (32)$$

و:

$$\frac{\partial \alpha_k}{\partial \dot{y}} = \frac{\Delta x_s}{\Delta x_s^2 + \Delta y_s^2} (t_k - t_f) = (t_k - t_f) \frac{\partial \alpha_k}{\partial y} \quad (33)$$

کران پایین کرامر رانو<sup>۱</sup> که حداقل خطای تخمین قابل دستیابی توسط یک تخمین گر بدون بایاس را تعیین می کند بصورت زیر تعریف می شود:

$$E[(X - \hat{X})(X - \hat{X})^T] \geq J^{-1} \quad (34)$$

که  $J$  ماتریس اطلاعات فیشر<sup>۲</sup> می باشد:

$$J \triangleq E[(\nabla_x \ln \Lambda(X))(\nabla_x \ln \Lambda(X))^T] \big|_{X=X_{true}} \quad (35)$$

می توان نوشت:

$$J = E[(\nabla_x \lambda(X))(\nabla_x \lambda(X))^T] \big|_{X=X_{true}} \quad (36)$$

همچنین:

$$\nabla_x \lambda(X) = \quad (37)$$

$$\sum_{i=1}^M H_i^T R_i^{-1} [z(t_i) - h(F(t_i, t_f) X(t_f), S(t_i))]$$

در نتیجه:

$$J = \sum_{i=1}^M H_i^T R_i^{-1} H_i \big|_{X=X_{true}} = H^T R^{-1} H \big|_{X=X_{true}} \quad (38)$$

چون مقدار واقعی  $X$  در دسترس نمی باشد، از تخمین آن برای محاسبه ماتریس اطلاعات فیشر و کران پایین کرامر رانو استفاده می شود. با توجه

<sup>2</sup> Fisher Information Matrix (FIM)

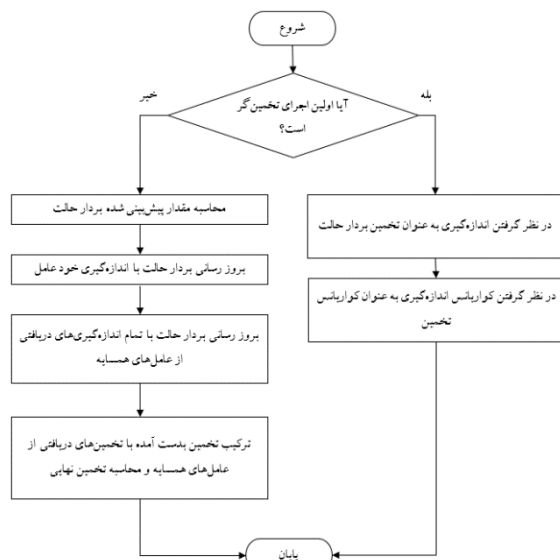
<sup>1</sup> Cramer-Rao Lower Bound (CRLB)

که  $z_{\ell,k}$  مقدار اندازه گیری شده توسط عامل همسایه  $\ell$  ام ( $\ell \in \mathcal{N}_k$ ) در لحظه  $k$  و  $R_{\ell,k}$  کواریانس نویز اندازه گیری عامل  $\ell$  ام در لحظه  $k$  می باشد. در آخرین گام نیز تخمین محاسبه شده برای بردار حالت با مقادیر تخمین زده شده توسط عامل های همسایه ترکیب شده و تخمین نهایی بردار حالت به همراه کواریانس آن مطابق با روابط ذیل محاسبه می گردد:

$$\hat{X}_{k|k} = \sum_{\ell \in \mathcal{N}_k} a_{\ell k} \hat{X}_{\ell,k|k} \quad (49)$$

$$P_{k|k} = \left( \sum_{\ell \in \mathcal{N}_k} a_{\ell k} (P_{\ell,k|k})^{-1} \right)^{-1} \quad (50)$$

که  $\hat{X}_{\ell,k|k}$  تخمین بردار حالت برای هدف موردنظر توسط عامل  $\ell$  ام و  $P_{\ell,k|k}$  کواریانس تخمین آن می باشد.



شکل ۵: فلوچارت فرایند فیلترینگ مبتنی بر استراتژی پخش

با توجه به پیچیدگی سیستم، احتمال ایجاد خط سیرهای اشتباه یا تکراری در فرایند ردیابی اهداف وجود دارد. خط سیرهای اشتباه، پس از مدتی به دلیل عدم تخصیص اندازه گیری به آنها حذف خواهند شد. اما ممکن است خط سیرهای تکراری باقی بمانند. بنابراین لازم است بعد از فیلترینگ، وجود اهداف یکسان مورد بررسی قرار گیرد. در صورت وجود خط سیرهای مشابه، خط سیری که عدم قطعیت بیشتری دارد حذف می شود. برای تعیین میزان عدم قطعیت یک خط سیر، از کواریانس تخمین بردار حالت آن استفاده شده است:

$$Uncertainty = (P_{11} + P_{22}) \times (P_{33} + P_{44}) \quad (51)$$

که  $P_{11}$  کواریانس  $\hat{x}$ ،  $P_{22}$  کواریانس  $\hat{y}$ ،  $P_{33}$  کواریانس  $\hat{\dot{x}}$  و  $P_{44}$  کواریانس  $\hat{\dot{y}}$  می باشد.

به منظور به اشتراک گذاری اطلاعات، هر عامل با استفاده از زیرساخت شبکه، اندازه گیری های خود را به همراه اهداف ردیابی شده به عامل های مجاور ارسال می نماید. در ساختار عامل حافظه ای برای نگهداری وضعیت آن در نظر گرفته شده است. پس از تکمیل فرایندها، وضعیت فعلی برای استفاده در اجراهای بعدی، ذخیره می شود.

به نتایج مناسب تخمین گر حداکثر شباهت، از کران پایین کرامر رانو به عنوان کواریانس نویز اندازه گیری مرکب استفاده شده است.

با توجه به خطی شدن معادله اندازه گیری به دلیل استفاده از ایده اندازه گیری مرکب و خطی بودن معادله حالت سیستم به دلیل بدون مانور بودن اهداف، از فیلتر کالمن مبتنی بر استراتژی پخش برای تخمین حالت سیستم استفاده شده است. به این منظور، خط سیرهای موجود با خط سیرهای تخمین زده شده توسط عامل های همسایه مقایسه شده و اطلاعات تمام خط سیرهای مشابه در فرایند فیلترینگ بکارگیری می شود. معیار شباهت بصورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$S_{ij} = (X_i - X_j)^T (P_i + P_j)^{-1} (X_i - X_j) \quad (39)$$

که  $X_i$  تخمین بردار حالت هدف توسط عامل  $i$  ام و  $X_j$  تخمین حالت هدف توسط عامل  $j$  ام است. همچنین  $P_i$  کواریانس تخمین  $X_i$  و  $P_j$  کواریانس تخمین  $X_j$  می باشد.

ماتریس های  $F$  و  $G$  بصورت زیر تعریف می شوند:

$$F \triangleq \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad G \triangleq \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \Delta t^2 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} \Delta t^2 \\ \Delta t & 0 \\ 0 & \Delta t \end{bmatrix} \quad (40)$$

که  $\Delta t$  فاصله زمانی می باشد. معادله حالت سیستم را می توان بصورت زیر نوشت:

$$X(k+1) = F X(k) + G v(k) \quad (41)$$

که  $v(k)$  نویز فرایند می باشد. ماتریس  $H$  بصورت زیر تعریف می شود:

$$H \triangleq \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (42)$$

در این صورت، معادله اندازه گیری بصورت زیر خواهد بود:

$$z(k) = H X(k) + w(k) \quad (43)$$

که  $w(k)$  نویز اندازه گیری می باشد.

فلوچارت فرایند فیلترینگ مبتنی بر استراتژی پخش در شکل ۵ آورده شده است. ابتدا مقدار پیش بینی شده بردار حالت هدف و ماتریس کواریانس آن محاسبه می گردد:

$$\hat{X}_{k|k-1} = F \hat{X}_{k-1|k-1} + G v(k) \quad (44)$$

$$P_{k|k-1} = F P_{k-1|k-1} F^T + G Q G^T \quad (45)$$

که  $Q$  کواریانس نویز فرایند است. در گام بعدی، تخمین بردار حالت، با توجه به اندازه گیری انجام شده توسط عامل موردنظر و همچنین اندازه گیری های دریافتی از مجموعه عامل های همسایه ( $\mathcal{N}_k$ )، مطابق با روابط زیر محاسبه می شود:

$$S = R_{\ell,k} + H P_{k|k-1} H^T \quad (46)$$

$$\hat{X}_{k|k} = \hat{X}_{k|k-1} + P_{k|k-1} H^T S^{-1} [z_{\ell,k} - H \hat{X}_{k|k-1}] \quad (47)$$

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - P_{k|k-1} H^T S^{-1} H P_{k|k-1} \quad (48)$$

که  $R_{nmax}$  حداکثر فاصله عامل موردنظر از عامل همسایه است و برای هر همسایه بصورت زیر تعیین می شود:

$$R_{nmax} = 0.95 \times \min\{CR_a, CR_{ni}\} \quad (59)$$

همچنین:

$$\forall j, R_{tj} \geq R_{tmin} \quad (60)$$

که  $R_{tmin}$  حداقل فاصله عامل موردنظر تا اهداف است که بصورت زیر تعیین می گردد:

$$R_{tmin} = 0.05 \times MR_a \quad (61)$$

که  $MR_a$  برد اندازه گیری عامل موردنظر است. همچنین:

$$\forall j, R_{tj} \leq R_{tmax} \quad (62)$$

که  $R_{tmax}$  حداکثر فاصله عامل موردنظر تا اهداف است که بصورت زیر تعیین می گردد:

$$R_{tmax} = 0.95 \times MR_a \quad (63)$$

همچنین کمترین و بیشترین مقدار زاویه کورس عامل، با توجه به حداکثر نرخ چرخش عامل و فاصله زمانی تا اجرای بعدی برنامه عامل، محاسبه شده و به الگوریتم های بهینه سازی اعمال می گردد.

پس از اجرای الگوریتم های بهینه سازی، نتایج حاصله ترکیب شده و زاویه کورس نهایی عامل بدست می آید:

$$C = \frac{K_{Rn}}{K_{Rn} + K_{Rt} + K_{Dt}} C_{Rn} + \frac{K_{Rt}}{K_{Rn} + K_{Rt} + K_{Dt}} C_{Rt} + \frac{K_{Dt}}{K_{Rn} + K_{Rt} + K_{Dt}} C_{Dt} \quad (64)$$

که  $C_{Rn}$ ،  $C_{Rt}$  و  $C_{Dt}$  به ترتیب کورس محاسبه شده بر مبنای حداکثر سازی فاصله تا عامل های همسایه، کورس محاسبه شده بر مبنای حداقل سازی فاصله تا اهداف و کورس محاسبه شده بر مبنای حداکثر سازی تعادل بر خط دید می باشند و  $K_{Rn}$ ،  $K_{Rt}$  و  $K_{Dt}$  نیز ضرایب مربوطه با همان ترتیب می باشند. با مشخص شدن کورس عامل، هنگام بروز رسانی پارامترهای حرکتی، موقعیت و سرعت عامل متناسب با این مقدار محاسبه خواهد گردید.

### ۳-۴ نحوه شبیه سازی سیستم

برای شبیه سازی سیستم از نرم افزار متلب و تکنیک برنامه نویسی شی گرا<sup>۱</sup> استفاده شده است. به این منظور یک کلاس<sup>۲</sup> برای مدل سازی اهداف، یک کلاس برای مدل سازی عامل ها و یک کلاس دیگر برای مدل کردن محیط، طراحی و پیاده سازی شده است. برای شبیه سازی سیستم کافی است از هر کلاس به تعداد مورد نیاز شیء<sup>۳</sup> ایجاد نموده و از هر شیء توابع لازم را اجرا نمود. به منظور ایجاد ناهمزمانی در سیستم، اجرای برنامه عامل ها با تاخیرهای تصادفی انجام می شود. فلوچارت کلی شبیه سازی در شکل ۶ آمده است.

جهت گیری عامل به سمت موقعیت مطلوب به نحوی تعیین می گردد که ضمن حفظ اتصال شبکه، دقت و سرعت همگرایی الگوریتم ردیابی، بهبود یافته و تا حد امکان، اهداف ردیابی شده از حوزه اندازه گیری سنسور خارج نشوند. به این منظور، سه الگوریتم بهینه سازی بطور مستقل اجرا شده و نتایج بدست آمده با هم ترکیب می شوند. اندازه سرعت عامل هنگام مانور، ثابت فرض می شود. متغیر کنترلی مورد استفاده برای بهینه سازی مانور، زاویه کورس عامل می باشد.

الگوریتم بهینه سازی اول، کورس عامل را طوری محاسبه می کند که عامل موردنظر حداکثر فاصله را از عامل های همسایه داشته باشد. این موضوع موجب افزایش رویت پذیری حالت اهداف و بهبود دقت تخمین ها می شود. تابع هزینه در این الگوریتم، بصورت زیر تعیین شده است:

$$cost = -\sum_i R_{ni} \quad (52)$$

که  $R_{ni}$  فاصله عامل همسایه  $i$  ام از عامل موردنظر می باشد. در الگوریتم بهینه سازی دوم، کورس عامل طوری محاسبه می شود که فاصله عامل از اهداف حداقل شود. این موضوع ضمن افزایش رویت پذیری حالت اهداف و دقت ردیابی، احتمال خارج شدن اهداف از برد اندازه گیری سنسور را کاهش می دهد. تابع هزینه این الگوریتم، بصورت زیر است:

$$cost = \sum_j R_{tj} \quad (53)$$

که  $R_{tj}$  فاصله هدف  $j$  ام از عامل موردنظر می باشد. الگوریتم بهینه سازی سوم، تلاش می کند جهت حرکت عامل، عمود بر خط دید اهداف باشد که موجب افزایش رویت پذیری و بهبود دقت تخمین ها می گردد. تابع هزینه مربوطه، بصورت زیر است:

$$cost = \sum_j K_1 \left(1 - e^{-K_2 \left(\lambda_j - \frac{\pi}{2}\right)^2}\right) \quad (54)$$

که  $K_1$  و  $K_2$  ضرایب ثابت بوده و  $\lambda_j$  سمت حرکت عامل نسبت به هدف  $j$  ام می باشد که برابر است با:

$$\lambda_j = |B_j - C| \quad (55)$$

که  $B_j$  سمت هدف یا همان زاویه خط دید هدف می باشد و  $C$  کورس عامل موردنظر است.

در هر سه الگوریتم بهینه سازی، قیدهای زیر نیز در نظر گرفته شده است:

$$\forall i, R_{ni} \geq R_{nmin} \quad (56)$$

که  $R_{nmin}$  حداقل فاصله عامل موردنظر از عامل همسایه است که برای هر همسایه بصورت زیر تعیین می شود:

$$R_{nmin} = 0.05 \times \min\{CR_a, CR_{ni}\} \quad (57)$$

که  $CR_a$  برد ارتباطی عامل موردنظر و  $CR_{ni}$  برد ارتباطی عامل همسایه  $i$  ام است.

$$\forall i, R_{ni} \leq R_{nmax} \quad (58)$$

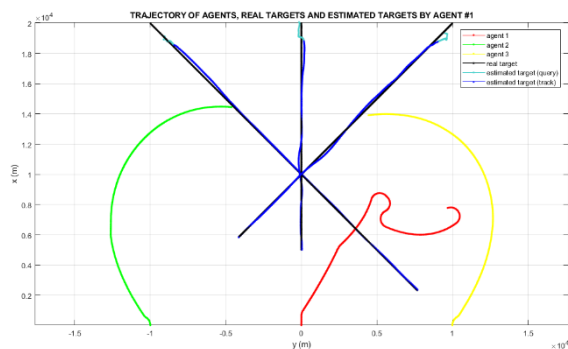
<sup>3</sup> Object

<sup>1</sup> Object-Oriented Programming

<sup>2</sup> Class

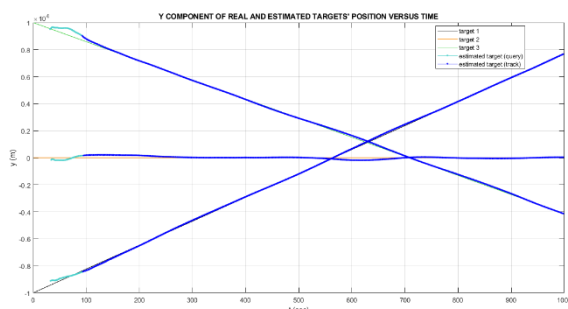


با دقت قابل قبولی تخمین زده است و با اینکه اهداف به یکدیگر نزدیک شده‌اند باز هم تفکیک بین آنها به خوبی انجام شده است.

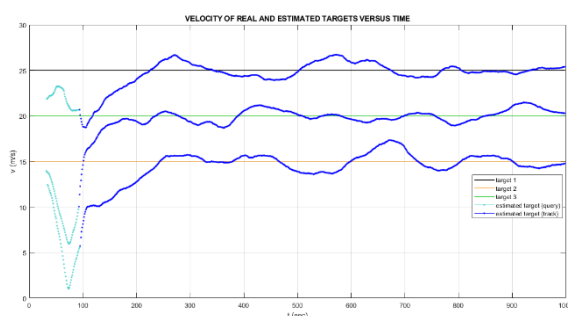


شکل ۷: مسیر حرکت عامل‌ها، اهداف واقعی و اهداف تخمین زده شده توسط عامل ۱

با توجه به تعداد عامل‌ها و اهداف، تعداد متغیرهای حالت بسیار زیاد می‌باشد؛ لذا به عنوان نمونه، مقدار واقعی متغیر  $\gamma$  برای هر سه هدف و همچنین مقدار تخمین زده شده آنها توسط عامل ۱ بر حسب زمان، در شکل ۸ نشان داده شده است. می‌توان حالت اهداف در دستگاه مختصات قطبی را نیز مورد بررسی قرار داد. به عنوان مثال، اندازه سرعت اهداف واقعی و اهداف تخمین زده شده توسط عامل ۱ در شکل ۹ آورده شده است.

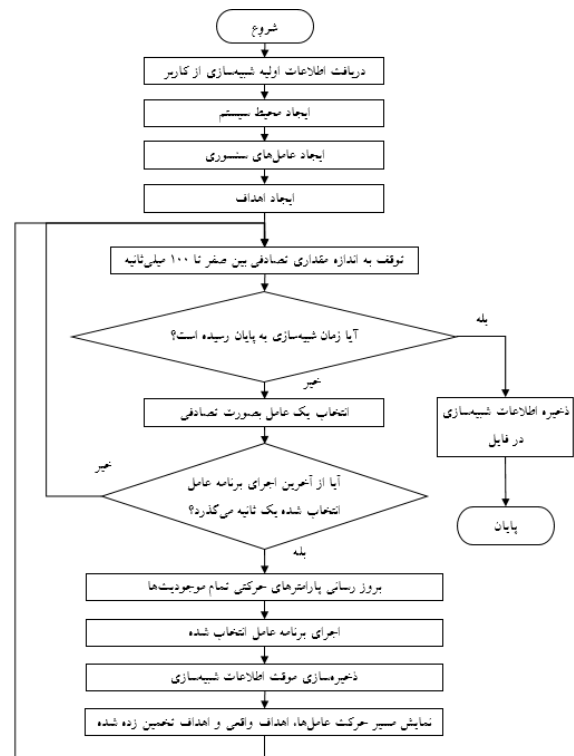


شکل ۸: مقدار واقعی و تخمین زده شده متغیر  $\gamma$  برای سه هدف توسط عامل ۱



شکل ۹: اندازه سرعت اهداف واقعی و اهداف تخمین زده شده توسط عامل ۱

به منظور تحلیل دقیق‌تر کارایی سیستم، بهتر است خطای تخمین متغیرهای حالت اهداف بررسی شود. با توجه به تعداد زیاد متغیرهای حالت



شکل ۶: فلوچارت کلی شبیه‌سازی سیستم

## ۴- نتایج شبیه‌سازی

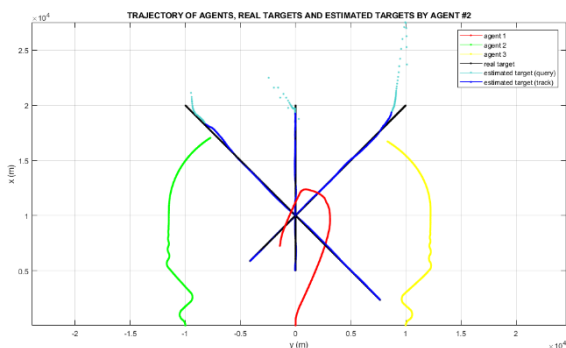
برای ارزیابی نحوه عملکرد سیستم، می‌توان از سناریوهای خاص با اهداف مشخص استفاده نمود. سناریوهای تصادفی نیز می‌تواند حالت‌های پیش‌بینی نشده‌ای را ایجاد نموده و موجب شناسایی نقاط ضعف احتمالی سیستم گردد. برای شبیه‌سازی حالت‌های خاص، یک سناریوی مبنا شامل سه عامل و سه هدف بصورت جدول ۱ تعریف می‌شود. انحراف معیار خطای اندازه‌گیری تمام سنسورها، ۲ درجه است. برای اینکه عامل‌ها محدودیتی از نظر برد اندازه‌گیری و برد ارتباطی نداشته باشند، برای این پارامترها مقادیر بسیار بزرگی در نظر گرفته شده است. زمان شبیه‌سازی ۱۰۰۰ ثانیه می‌باشد.

جدول ۱: سناریوی مبنا

موجودیت	پارامتر		هدف ۱	هدف ۲	هدف ۳	عامل ۱	عامل ۲	عامل ۳
	نام پارامتر	واحد						
موقعیت اولیه در راستای X	موقعیت اولیه در راستای X	متر	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۰	۰	۰
	موقعیت اولیه در راستای Y	متر	۱۰۰۰	۰	-۱۰۰۰	۱۰۰۰	-۱۰۰۰	۰
سرعت اولیه	سرعت اولیه	متر بر ثانیه	۲۰	۱۵	۲۵	۲۰	۲۰	۲۰
	کورس اولیه	درجه	۲۲۵	۱۸۰	۱۳۵	۰	۰	۰

مسیر حرکت عامل‌ها، اهداف واقعی و اهداف تخمین زده شده توسط عامل ۱ در شکل ۷ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که عامل موردنظر، هم تعداد اهداف را به درستی تشخیص داده و هم حالت آنها را

۱۱ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که عامل‌ها، به دلیل محدودیت برد ارتباطی و برای حفظ اتصال شبکه نمی‌توانند زیاد از هم دور شوند و این موضوع اثر منفی بر روی پذیرایی متغیرهای حالت و دقت تخمین‌ها نسبت به سناریوی مبنا دارد. با وجود محدودیت‌های فوق، خط‌سیرهای تخمین زده شده انطباق خوبی با مسیر حرکت اهداف واقعی دارند.



شکل ۱۱: مسیر حرکت عامل‌ها، اهداف واقعی و اهداف تخمین زده شده توسط عامل ۲

به عنوان نمونه، خطای تخمین متغیرهای حالت هدف ۳ توسط عامل دوم در کل مدت زمان ردیابی، در جدول ۳ آورده شده است. با اینکه هدف بطور مستقیم در برد اندازه‌گیری این سنسور نبوده است، خطای ردیابی در حد مناسب و قابل قبول می‌باشد.

جدول ۳: خطای تخمین متغیرهای حالت هدف ۳ توسط عامل ۲

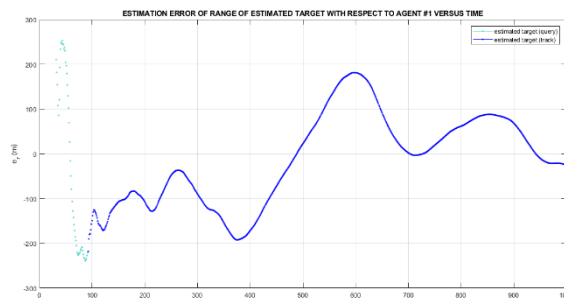
نام متغیر حالت	واحد اندازه‌گیری	میانگین خطای تخمین	انحراف معیار خطای تخمین
موقعیت هدف در راستای محور X	متر	-۳۰/۶	۸۵/۳
موقعیت هدف در راستای محور Y	متر	-۱۶/۵	۳۵/۱
سرعت هدف در راستای محور X	متر بر ثانیه	-۰/۱	۱/۵
سرعت هدف در راستای محور Y	متر بر ثانیه	-۱/۱	۰/۴
فاصله هدف	متر	-۳۳/۳	۶۰/۹
زاویه سست هدف	درجه	۰/۳	۰/۱۹
اندازه سرعت هدف	متر بر ثانیه	۰/۱	۱/۰
زاویه کورس هدف	درجه	-۰/۲	۳/۸

یک سناریوی دیگر شامل سه سنسور و چهار هدف، با پارامترهایی که بصورت تصادفی انتخاب شده و در جدول ۴ آورده شده است، شبیه‌سازی شده و نتایج مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول ۴: سناریو با پارامترهایی که بصورت تصادفی انتخاب شده‌اند

پارامتر	موجودیت		عامل ۱	عامل ۲	عامل ۳	هدف ۱	هدف ۲	هدف ۳	هدف ۴
	نام پارامتر	واحد اندازه‌گیری							
موقعیت اولیه در راستای X	متر	۵۰۰۰	۱۰۰۰۰	۳۰۰۰	۱۰۰۰۰	-۱۰۰۰۰	-۱۰۰۰۰	۱۵۰۰۰	۴
موقعیت اولیه در راستای Y	متر	-۱۲۰۰۰	-۲۰۰۰	۲۰۰۰	-۲۰۰۰۰	۸۰۰۰	-۸۰۰۰	-۵۰۰۰	۳
سرعت اولیه	متر بر ثانیه	۱۷	۲۸	۲۱	۲۹	۱۸	۱۴	۲۲	۲
کورس اولیه	درجه	۲۹	۱۵۴	۴۲	۱۶۰	۲۲۴	۹۰	۱۷۳	۱
انحراف معیار خطای اندازه‌گیری	درجه	۳	۲/۵	۱/۵	-	-	-	-	-
برد اندازه‌گیری	کیلومتر	۳۵	۳۵	۲۵	-	-	-	-	-
برد ارتباطی	کیلومتر	۳۰	۲۵	۳۵	-	-	-	-	-

اهداف، به عنوان نمونه، خطای تخمین فاصله هدف ۳ توسط عامل ۱ در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که با گذشت زمان به تدریج اندازه خطا کاهش پیدا کرده است. حدود ۶۰۰ ثانیه پس از شروع شبیه‌سازی، به دلیل نزدیکی زیاد هدف ۳ با هدف ۲، خطای تخمین اندکی افزایش یافته اما با گذشت زمان و دور شدن اهداف از یکدیگر، مجدداً خطا کم شده است.



شکل ۱۰: خطای تخمین فاصله هدف ۳ توسط عامل ۱

خطای ردیابی تمامی متغیرهای حالت هدف ۳ توسط عامل ۱ در کل مدت زمان ردیابی، در جدول ۲ خلاصه شده است. مشاهده می‌شود که خطای ردیابی هدف، در حد مناسب و قابل قبول می‌باشد.

بررسی خطای تخمین متغیرهای حالت اهداف توسط عامل‌های ۲ و ۳ نشان می‌دهد که خط‌سیرهای تخمین زده شده توسط آنها نیز مشابه با عامل ۱ می‌باشد و به منظور عدم بیان مطالب تکراری، از ارائه آنها صرفنظر می‌شود.

جدول ۲: خطای تخمین متغیرهای حالت هدف ۳ توسط عامل ۱

نام متغیر حالت	واحد اندازه‌گیری	میانگین خطای تخمین	انحراف معیار خطای تخمین
موقعیت هدف در راستای محور X	متر	-۳۷/۵	۸۰/۵
موقعیت هدف در راستای محور Y	متر	-۳۱/۸	۵۸/۵
سرعت هدف در راستای محور X	متر بر ثانیه	-۰/۳	۱/۲
سرعت هدف در راستای محور Y	متر بر ثانیه	-۰/۱	۰/۹
فاصله هدف	متر	-۱۲/۶	۱۰۱
زاویه سست هدف	درجه	۰/۰۲	۰/۲۶
اندازه سرعت هدف	متر بر ثانیه	۰/۲	۱/۱
زاویه کورس هدف	درجه	-۰/۵	۲/۷

به منظور بررسی محدودیت‌های برد اندازه‌گیری و برد ارتباطی بر عملکرد سیستم، سناریوی مبنا مدنظر قرار گرفته ولی برد اندازه‌گیری و برد ارتباطی تمام عامل‌ها، ۲۵ کیلومتر تعیین می‌گردد. به این ترتیب، در شروع شبیه‌سازی، هر سه عامل می‌توانند با هم تبادل داده باشند. همچنین عامل ۱ می‌تواند هر سه هدف را تشخیص داده و سمت آنها را اندازه‌گیری نماید. اما عامل دوم فقط قادر به تشخیص و اندازه‌گیری سمت اهداف ۱ و ۲ بوده و هدف ۳ در برد اندازه‌گیری آن نمی‌باشد. عامل ۳ نیز فقط قادر به آشکارسازی و اندازه‌گیری سمت اهداف ۲ و ۳ خواهد بود. مسیر حرکت عامل‌ها، اهداف واقعی و اهداف تخمین زده شده توسط عامل ۲ در شکل

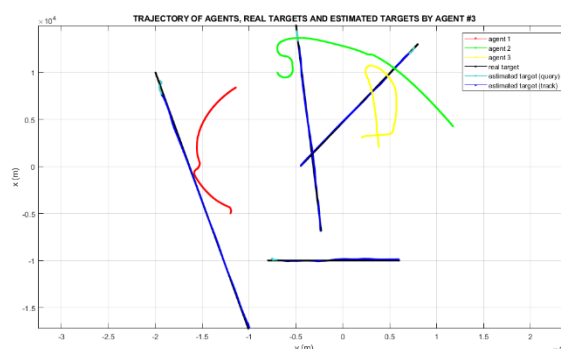
دارند، با خطای قابل قبولی ردیابی می شوند. همچنین در برخی از سناریوها بعضی از اهداف بطور مستقیم در برد اندازه گیری یکی از عامل ها نبوده اما در لیست اهداف تخمین زده شده توسط این عامل قرار داشتند؛ علت این موضوع، استفاده از اطلاعات دریافتی از عامل های همسایه در فرایند تخمین حالت و ردیابی اهداف می باشد.

در این تحقیق، به منظور پرهیز از افزایش حجم محاسبات محلی، از الگوریتم های ساده با بار پردازشی پایین، استفاده گردیده است. با توجه به امکان استفاده از پردازشگرهای قوی تر، می توان از الگوریتم های پیشرفته تر نیز استفاده نمود. برای وابسته سازی داده از الگوریتم نزدیک ترین همسایه استفاده شده است که ضعف اصلی آن هنگام مواجهه با اهداف نزدیک به هم می باشد. با استفاده از روش هایی مانند الگوریتم وابسته سازی داده احتمالاتی، احتمال اشتباه در تخصیص اندازه گیری ها به اهداف، کاهش یافته و کارایی سیستم بهبود می یابد. همچنین برای بهبود عملکرد فیلتر کالمن مبتنی بر استراتژی پخش، می توان محاسبه تخمین نهایی را بصورت تطبیقی انجام داد. اگر چه توزیع سنسورها در محیط، از ضرورت انجام مانور توسط عامل ها می کاهد اما چگونگی مانور عامل ها تاثیر فراوانی بر دقت تخمین ها دارد. طراحی مسیر بهینه عامل ها نیز می تواند به عنوان یک موضوع تحقیقاتی مورد توجه قرار گیرد. در این تحقیق، اهداف بدون مانور فرض شده اند. می توان ردیابی اهداف مانوردار را نیز مدنظر قرار داد که در این صورت با یک مسئله فیلترینگ غیرخطی روبرو خواهیم بود.

## مراجع

- [1] Stansfield R. G., 1947, "Statistical theory of DF fixing," J. Inst. Electr. Eng. IIIA Radiocommun., vol. 94, no. 15, pp. 762–770.
- [2] Taghavi E., Tharmarasa R., Kirubarajan T. and McDonald M., 2016, "Multisensor-multitarget bearing-only sensor registration," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 52, no. 4, pp. 1654–1666.
- [3] Mohammadi A. and Asif A., 2015, "Distributed consensus + Innovation particle filtering for bearing/range tracking with communication constraints," IEEE Trans. Signal Process., vol. 63, no. 3, pp. 620–635.
- [4] Ferdowsi M. H., Maralani P. J. and Sedigh A. K., 2004, "Design of bearing-only vision-based tracking filters," Opt. Eng., vol. 43, no. 2, pp. 472–481.
- [5] Sadhu S., Mondal S., Srinivasan M. and Ghoshal T. K., 2006, "Sigma point Kalman filter for bearing only tracking," Signal Processing, vol. 86, no. 12, pp. 3769–3777.
- [6] Ristic Branko, Arulampalam Sanjeev and Gordon Neil, Beyond the Kalman filter: Particle filters for tracking applications. Artech house, 2003.
- [7] Sabet M. T., Fathi A. R. and Mohammadi Daniali H. R., 2016, "Optimal design of the Own Ship

مسیر حرکت عامل ها، اهداف واقعی و اهداف تخمین زده توسط عامل ۳، به عنوان نمونه در شکل ۱۲ آورده شده است.



شکل ۱۲: مسیر حرکت عامل ها، اهداف واقعی و اهداف تخمین زده شده توسط عامل ۳

همچنین خطای تخمین هدف ۴ توسط عامل ۳ نیز به عنوان نمونه در جدول ۵ آمده است. مشاهده می شود که خطای ردیابی در حد مناسب و قابل قبول می باشد.

جدول ۵: خطای تخمین متغیرهای حالت هدف ۴ توسط عامل ۳

نام متغیر حالت	واحد اندازه گیری	میانگین خطای تخمین	انحراف معیار خطای تخمین
موقعیت هدف در راستای محور X	متر	-۵۶/۲	۵۳/۷
موقعیت هدف در راستای محور Y	متر	-۱۳/۲	۵۲/۶
سرعت هدف در راستای محور X	متر بر ثانیه	-۰/۱	۰/۸
سرعت هدف در راستای محور Y	متر بر ثانیه	-۰/۰۱	۰/۶
فاصله هدف	متر	۳۰/۹	۷۶/۶
زاویه سمت هدف	درجه	-۰/۱۴	۰/۲۲
اندازه سرعت هدف	متر بر ثانیه	۰/۰۵	۰/۷
زاویه کورس هدف	درجه	۰/۰۸	۱/۷

## ۵- نتیجه گیری و پیشنهاد

در این تحقیق، سیستم ردیابی چندهدفی چندسنسوری غیرمترکز و همکارانه با اندازه گیری غیرهمزمان سمت، در قالب یک سیستم چندعامله، طراحی و پیاده سازی شده است. در این سیستم، عامل های سنسوری هوشمند نقش محوری و تعیین کننده ای دارند. هدف اصلی، طراحی و پیاده سازی برنامه این عامل ها بوده است. به دلیل فرض بدون مانور بودن اهداف، مدل سیستم موردنظر برای تخمین حالت، خطی می باشد. استفاده از ایده اندازه گیری مرکب نیز موجب خطی شدن مدل اندازه گیری شده است. لذا از فیلتر کالمن توزیع شده مبتنی بر استراتژی پخش به منظور ردیابی اهداف استفاده گردیده است. همچنین عامل ها تلاش می کنند ضمن حفظ اتصال شبکه و تعقیب اهداف، به نحوی مانور نمایند که سرعت و دقت ردیابی افزایش یابد.

شیبه سازی های متعدد نشان می دهند که سیستم موردنظر با وجود محدودیت های در نظر گرفته شده، عملکرد و کارایی قابل قبولی داشته و می تواند تعداد و حالت اهداف مختلف موجود در منطقه تحت نظارت را با کیفیت و دقت مناسب تخمین بزند. اهدافی که در برد اندازه گیری حداقل دو سنسور قرار داشته و این سنسورها به نحو مناسبی از یکدیگر فاصله

- measurements from passive sensors,” IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 49, no. 4, pp. 2799–2806.
- [21] Osborne R. W., 2015, “Fusion of Asynchronous Passive Measurements,” J. Adv. Inf. FUSION, vol. 10, no. 2, pp. 199–210.
- maneuver in the bearing-only target motion analysis problem using a heuristically supervised Extended Kalman Filter,” Ocean Eng., vol. 123, pp. 146–153.
- [8] Nardone S. and Lindgren A., 1984, “Fundamental properties and performance of conventional bearings-only target motion analysis,” IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 29, no. 9, pp. 775–787.
- [9] Oshman Y. and Davidson P., 1999, “Optimization of observer trajectories for bearings-only target localization,” IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 35, no. 3, pp. 892–902.
- [10] Chen X., Tharmarasa R. and Kirubarajan T., 2014, “Multitarget Multisensor Tracking,” in Academic Press Library in Signal Processing: Volume 2 Communications and Radar Signal Processing, vol. 2, Elsevier Masson SAS, pp. 759–812.
- [11] Musicki D., 2008, “Multi-target tracking using multiple passive bearings-only asynchronous sensors,” IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 44, no. 3, pp. 1151–1160.
- [12] Sathyan T. and Sinha A., 2011, “A two-stage assignment-based algorithm for asynchronous multisensor bearings-only tracking,” IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 47, no. 3, pp. 2153–2168.
- [13] Sayed A. H., 2014, “Adaptive networks,” Proc. IEEE, vol. 102, no. 4, pp. 460–497.
- [14] Dias S. S. and Bruno M. G. S., 2013, “Cooperative Target Tracking Using Decentralized Particle Filtering and RSS Sensors,” IEEE Trans. Signal Process., vol. 61, no. 14, pp. 3632–3646.
- [15] Olfati-Saber R., Fax J. A. and Murray R. M., 2007, “Consensus and cooperation in networked multi-agent systems,” Proc. IEEE, vol. 95, no. 1, pp. 215–233.
- [16] Zhou Y., Wang D. and Li J., 2014, “Consensus 3-D bearings-only tracking in switching sensor networks,” Signal Processing, vol. 105, pp. 148–155.
- [17] Mohammad A. and Asif A., 2016, “Diffusive particle filtering for distributed multisensor estimation,” ICASSP, IEEE Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process. - Proc., vol. 2016–May, no. 504310, pp. 3801–3805.
- [18] Tu S. Y. and Sayed A. H., 2012, “Diffusion strategies outperform consensus strategies for distributed estimation over adaptive networks,” IEEE Trans. Signal Process., vol. 60, no. 12, pp. 6217–6234.
- [19] Klein I. and Bar-Shalom Y., 2016, “Tracking with asynchronous passive multisensor systems,” IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 52, no. 4, pp. 1769–1776.
- [20] Osborne R. W. and Bar-Shalom Y., 2013, “Statistical efficiency of composite position