

موقعیت‌یابی هدف متحرک دریایی با استفاده همزمان از

ماهواره‌های GEO و فیلتر کالمن

محمودرضا رضوی زاده^{۱*}، میثم رئیس دانایی^۲

۱- مربی سازمانی گروه مخابرات و جنگال، دانشکده شناسایی، دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (علیه‌السلام)

۲- استادیار دانشکده و پژوهشکده برق، جنگ الکترونیک و سایبری، دانشگاه جامع امام حسین (علیه‌السلام)

چکیده:

موقعیت‌یابی هدف‌ها، دارای کاربردهای فراوانی است و انجام آن روش‌های مختلف دارد. این پژوهش، به موقعیت‌یابی هدف متحرک دریایی با تأکید بر استفاده همزمان از ماهواره‌های مدار GEO و فیلتر کالمن پرداخته است. برای موقعیت‌یابی با استفاده از ماهواره‌های GEO تکنیک استفاده همزمان از TDOA و FDOA استفاده شده است. به علت تحرک هدف، روابط مورد استفاده در معادلات موقعیت‌یابی توسط ماهواره GEO کارایی خود را از دست می‌دهند و تعداد مجهولات بیشتر از تعداد معادلات می‌شود. به همین منظور، از فیلتر کالمن برای پیش‌بینی سرعت هدف استفاده شده تا مجهولات را کاهش داده و بتوان موقعیت‌یابی را توسط معادلات ماهواره GEO انجام داد. به علاوه، فیلتر کالمن نیز از موقعیت لحظه‌ای به دست آمده توسط معادلات GEO استفاده می‌کند آنها را هموارتر می‌کند. روش پیشنهادی در کار حاضر، توانسته است با دقت مناسبی موقعیت و سرعت هدف متحرک دریایی را تخمین بزند.

واژه‌های کلیدی:

ماهواره‌های GEO، فیلتر کالمن خطی، TDOA، FDOA، موقعیت‌یابی، هدف متحرک.

Localization of a Moving Marine Target by Using Simultaneously GEO Satellites and Kalman Filter

Mahmoud Reza Razavi Zade^{1*}, Meysam Raees Danaee²

1. Imam Hossein University, Tehran, Iran

2. Faculty of Electrical, Electronic Warfare and cyber, Imam Hossein University, Tehran, Iran

Abstract:

Localization has many applications and there are different methods to do it. This research has focused on the Geolocation of the moving marine target with emphasis on the simultaneous use of GEO satellites and the Kalman filter. For Geolocation using GEO satellites, the technique of simultaneous use of TDOA and FDOA was used. Due to the presence of motion and non-zero velocity for the target, the relationships used in the localization equations by GEO satellite lose their effectiveness and the number of unknowns becomes more than the number of equations. For this purpose, we use the Kalman filter to reduce these unknowns by using the predicted speed given by the Kalman filter and to be able to do the localization by the GEO satellite equations. Additionally, the Kalman filter uses the position obtained by the GEO equations and makes them smoother. According to the findings of this research, the Kalman filter was able to accurately estimate the location and speed of the moving sea target.

Keywords:

Geo Satellites, Linear Kalman Filter, TDOA, FDOA, Geolocation, Moving Target.

* Corresponding author: bijdono@gmail.com

۱- مقدمه

در بسیاری از کاربردها لازم می‌شود تا موقعیت هدف‌ها که عمدتاً هدف‌ها غیرخودی (ثابت یا متحرک) هستند، توسط سامانه‌های موقعیت‌یابی مشخص شوند. متأسفانه به علت این که این هدف‌ها در خارج از قلمرو کنترل نیروهای خودی قرار دارند، نیازمندیم تا از مجموعه‌ای از سامانه‌های مخابراتی استفاده کنیم که در اختیار مردم سراسر دنیا وجود دارد و عموماً برای هدف اختصاصی موقعیت‌یابی طراحی نشده‌اند. یکی از این ابزارها استفاده از سیگنال‌ها و اطلاعات ارسالی توسط ماهواره‌های قرار گرفته در مدار^۱ GEO است. این ماهواره‌ها نقش رله کردن اطلاعات را بر عهده دارند و اطلاعات را از فرستنده زمینی دریافت و در مناطق تحت پوشش خود به صورت آینه‌ای بازتاب می‌کنند. از این اطلاعات می‌توان استفاده نمود و موقعیت فرستنده را استخراج کرد. البته این امر دارای چالش‌های فراوانی است که از جمله آن‌ها به سه مورد اشاره می‌شود:

۱) آشکارسازی سیگنال‌های خیلی ضعیف در کانال ماهواره مجاور (به شرط دسترسی به ماهواره مجاور)،^۲ اندازه‌گیری شیفت تأخیر زمانی و فرکانس،^۳ تبدیل این اندازه‌گیری‌ها به یک موقعیت مکانی دقیق.

برای یافتن موقعیت فرستنده می‌توان از حداقل دو ماهواره استفاده کرد؛ به نحوی که ماهواره دوم که ماهواره‌ی ثانویه نامیده می‌شود (و برای دریافت اطلاعات فرستنده نیست) به طور اتفاقی اطلاعات فرستنده را در لوب اصلی خود دریافت می‌کند و می‌توان از بازارسال اطلاعات فرستنده از طریق ماهواره دوم در کنار ماهواره اصلی موقعیت فرستنده را به دست آورد. متأسفانه در بسیاری از مواقع سیگنال دریافتی از فرستنده در ماهواره ثانویه به علت موقعیتی که ماهواره قرار گرفته است و یا نوع و زاویه لوب اصلی فرستنده، بسیار ضعیف است. وقتی هدف ثابت است اما ماهواره دارای حرکت محدودی است با استفاده از دو ماهواره و با اندازه‌گیری اختلاف زمان ورود^۲ (TDOA) و اندازه‌گیری اختلاف فرکانس ورود^۳ (FDOA) می‌توان موقعیت فرستنده را استخراج نمود. هدف این پژوهش

ردگیری هدف متحرک دریافتی توسط ماهواره GEO است. متأسفانه وقتی هدف متحرک است؛ تعداد مجهولات بیشتر از معادلات می‌گردد و موقعیت‌یابی ناممکن می‌گردد. برای حل این مشکل، در این کار، در کنار معادلات به دست آمده از ماهواره‌های GEO، از فیلتر کالمن نیز بهره گرفته می‌شود تا با پیش‌بینی موقعیت و سرعت هدف، تعداد مجهولات را کاهش داده و موقعیت‌یابی را ممکن سازد.

۲- مرور کارهای انجام شده

در زمینه موقعیت‌یابی ماهواره‌ای (البته با استفاده از ماهواره‌های مدار GEO) تاکنون تحقیقات اندکی انجام شده است. تعداد معدودی مقاله در این زمینه وجود دارد که به صورت مختصر به آنها اشاره می‌شود.

هو^۴ و چان^۵ دو مجموعه راه‌حل (یکی TDOA، دیگری ترکیب اندازه‌گیری‌های TDOA و FDOA) برای موقعیت‌یابی یک فرستنده با ارتفاع مشخص ارائه داده‌اند. راه‌حل پیشنهادی، معادلات اندازه‌گیری را تبدیل می‌کند؛ متغیرهای نامطلوب را معرفی می‌کند و محل فرستنده را با حداقل مربعات محدود حل می‌کند. بایاس^۶ موقعیت (به دلیل دانش نادرست از ارتفاع فرستنده) مستقیماً با خطای ارتفاع متناسب است. بایاس به هندسه موقعیت‌یابی وابسته است؛ اما تحت تأثیر نویز اندازه‌گیری قرار نمی‌گیرد. هرچه راه‌حل نامحدود دقیق‌تر باشد، خطای ارتفاع موردنیاز برای بهبود دقت کوچک‌تر خواهد بود. برای یافتن موقعیت فرستنده‌ای روی زمین، به وسیله اندازه‌گیری‌هایی از M ماهواره که موقعیت و سرعت آنها معلوم و مشخص است، لازم است که یک ایستگاه زمینی باشد تا بتوان M-1 مجموعه از TDOA ها را بین فرستنده (ماهواره) اول و i ام به دست آورد. اگر ماهواره‌ها در مدار GEO یا مدارهای پایین‌تر باشند، یک دسته از FDOA ها نیز قابل محاسبه خواهد بود؛ بنابراین مسئله عبارت است از تعیین موقعیت فرستنده با استفاده از اندازه‌گیری TDOA به تنهایی یا ترکیبی از اندازه‌گیری‌های TDOA و FDOA که در نتیجه ارتفاع فرستنده را خواهد داد [1].

⁴ Ho

⁵ Chan

⁶ bias

¹ Geosynchronous satellite

² Time Difference of Arrival

³ Frequency Difference of Arrival

تکنیک مورد استفاده در مقاله هاوورث^۱ و همکاران متکی به اندازه‌گیری TDOA و (یا) FDOA سیگنال‌های تداخل است که از طریق ماهواره‌های ارتباطی ارسال می‌شوند (ماهواره تداخل‌یافته و ماهواره‌های مجاور، در قوس زمین ثابت هستند). اختلاف مسیر بین دو ماهواره، TDOA و حرکات نسبی ماهواره‌ها نسبت به زمین، FDOA را در ایستگاه نظارت تولید می‌کند. برای به‌دست‌آوردن موقعیت فرستنده از طریق مشاهدات TDOA و FDOA، تعیین موقعیت و سرعت ماهواره‌ها در زمان مشاهده و از نظر هندسی، تعیین LOP^2 ها در روی زمین، متناظر با TDOA و FDOA مشاهده‌شده، ضروری است. تقاطع LOP ها، موقعیت فرستنده را مشخص می‌کند [2].

در مقاله یان^۳ و همکاران، بحث از یک سیستم موقعیت‌یابی دو ماهواره‌ای است که محل منبع ساکن را با استفاده از اندازه‌گیری‌های DTO^4 و DFO^5 یک سیگنال که توسط دو ماهواره زمین ثابت اصلی و مجاور بازارسال و توسط دو ایستگاه زمینی واقع در ناحیه دید هر دو ماهواره دریافت می‌شود، تخمین می‌زند. صحت و دقت این سیستم به دقت تخمین پارامترها و افریس^۶ دو ماهواره بستگی دارد. با تجزیه و تحلیل اصول موقعیت و اندازه‌گیری پارامترها، $CRLB^8$ محدود به دقت مکان در این مقاله استخراج شده است. پارامترهای DTO و DFO به ترتیب ناشی از اختلاف سرعت و اختلاف برد هستند. به‌منظور بهره‌برداری دقیق از مشاهده پارامترهای سیگنال هدف، تعیین موقعیت و سرعت دو ماهواره (به‌عنوان مثال افریس) در زمان مشاهده و از لحاظ هندسی، تعیین خطوط موقعیت ضروری است. در این مقاله، دقت مکان سیستم موقعیت‌یابی دو ماهواره‌ای در سناریوهایی با و بدون خطاهای افریس به‌طور سیستماتیک استخراج شده است. نتایج آماری ده هزار آزمایش مستقل توافق

خوبی با نتایج نظری هم از نظر صحت مکان و هم احتمال بیضی خطای مکان نشان می‌دهد [3].

لیو^۹ و همکاران نیز به بررسی خطای موقعیت‌یابی و آفست زمان و فرکانس با استفاده از سیستم موقعیت‌یابی دو ماهواره‌ای پرداختند. یافتن یک منبع استاتیک در روی زمین با استفاده از اندازه‌گیری (TDOA) و (FDOA) که توسط یک سیستم موقعیت‌یابی دو ماهواره‌ای به‌دست‌آمده و مورد بررسی قرار می‌گیرد. TDOA و FDOA مربوط به منبع در معرض آفست زمان و فرکانس نامشخص هستند؛ زیرا این دو ماهواره به‌طور ناقص از نظر زمان هماهنگ‌شده یا قفل‌شده با فرکانس هستند. مکان‌های ماهواره نیز به‌طور دقیق مشخص نیستند. برای شناسایی موقعیت منبع و کاهش اثر خطاهای موقعیت ماهواره، از ایستگاه‌های کالیبراسیون در موقعیت‌های شناخته‌شده استفاده می‌شود. در این مقاله، یک الگوریتم جدید موقعیت جغرافیایی به فرم بسته ارائه شده است. ابتدا اندازه‌گیری‌های TDOA و FDOA را از ایستگاه‌های منبع و کالیبراسیون با هم ترکیب می‌کند تا یک جفت واحد TDOA و FDOA برای موقعیت جغرافیایی منبع تولید کند. این مرحله ترکیب اندازه‌گیری با در نظر گرفتن وجود خطاهای موقعیت ماهواره، آفست زمان و فرکانس را از بین می‌برد. موقعیت منبع از طریق موقعیت جغرافیایی استاندارد TDOA-FDOA پیدا می‌شود. الگوریتم توسعه‌یافته از پیچیدگی کمی برخوردار است و تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که تحت نویزهای گوسی و شرایط خفیف به CRLB می‌رسد [4].

۳- طرح مسأله

یکی از مسائلی که در نبردهای اطلاعاتی حائز اهمیت فراوان است مسئله اشراف اطلاعاتی است؛ بدین معنی که اطلاعات کامل و با جزئیات دقیق از آنچه در صحنه نبرد وجود دارد، در دسترس باشد. مبحث موقعیت‌یابی یکی از این جزئیات است و دارای کاربردهای فراوان است. امروزه یافتن مکان دقیق اشیاء با استفاده از امواج الکترومغناطیس در بسیاری از پژوهش‌های علمی یافت می‌شود. یکی از این موارد که البته کمتر به آن پرداخته شده است، استفاده از لینک‌های ارتباطی ماهواره‌های مدار

¹ Haworth

² Line of Position

³ Yan

⁴ Differential Time Offset

⁵ Differential Frequency Offset

⁶ Geostationary

⁷ Ephemeris

⁸ Cramer-Rao Lower Bound

⁹ Liu

قابل استفاده برای زمان رکورد کم

معایب:

نیازمند دو ماهواره ثانویه

نیازمند ۳ آنتن گیرنده

معایب و مزایای روش TDOA/FDOA

مزایا:

نیازمند فقط یک ماهواره ثانویه

نیازمند دو آنتن گیرنده

معایب:

نیازمند افریس برای رسیدن به دقت خوب

بدون مرجع قابل استفاده نیست

برای هدف‌های متحرک مناسب نیست

سه ساعت در روز، خطا بالای ۱۰۰۰ کیلومتر است.

نیاز به حداقل ۳۰ ثانیه زمان برای رکوردگیری

با توجه به مزایا و معایب هرکدام از دو روش و با در

نظر گرفتن محدودیت‌های موجود، روش TDOA-FDOA انتخاب شد.

۳-۲- بررسی تئوری موقعیت‌یابی

هدف از مطالعه تئوری، بررسی تکنیک‌های مختلف و موجود موقعیت‌یابی فرستنده، به‌منظور شناسایی آن دسته از گزینه‌هایی است که از نظر هزینه بهترین مزایا را دارند. همچنین بررسی حساسیت تکنیک به پارامترهای مختلف درگیر و ارزیابی دوام و عملکرد آن هنگام اعمال به ماهواره‌ها بوده است. در ادامه بررسی تئوری مربوط به روش انتخاب شده، ارائه شده است.

۳-۳- اصول اندازه‌گیری و هندسه موقعیت‌یابی

تکنیک انتخاب‌شده بر اساس اصل مربوط به تعیین همزمان DSR^1 (دامنه شیب تفاضلی) و $DSRR^2$ (نرخ دامنه شیب تفاضلی) مرتبط با یک سایت فرستنده ناشناس و دو ماهواره زمین‌ثابت است که یکی از آن‌ها ماهواره اصلی و دیگری ماهواره‌ای در نزدیک‌ترین فاصله از ماهواره اصلی است.

DSR و $DSRR$ با اطلاع از موقعیت و سرعت ماهواره و با اندازه‌گیری TDOA و FDOA مربوط به سیگنال تداخل که توسط ماهواره تداخل‌شده و ماهواره مجاور مجدداً ارسال شده و دریافت آن توسط دو ایستگاه زمینی

GEO است. در پژوهش حاضر تمرکز بر روی یافتن مکان هدف متحرک دریایی با استفاده همزمان از ماهواره‌های GEO و فیلتر کالمن است.

مسأله موقعیت‌یابی با استفاده از ماهواره‌های GEO عمدتاً به دو روش انجام می‌شود:

- 1) TDOA-TDOA
- 2) TDOA-FDOA

در روش اول با استفاده از یک ماهواره اصلی و یک ماهواره در مجاورت ماهواره اصلی، اختلاف زمان ورود سیگنال از هدف موردنظر به ماهواره‌ها و از ماهواره‌ها تا ایستگاه‌های گیرنده زمینی از مسیر این دو ماهواره محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از روابط موجود، می‌توان مجموعه نقاطی را که در معادله مکان موقعیت هدف صدق می‌کند، رسم نمود. این نقاط تشکیل یک بیضی را می‌دهند. در مرحله بعد از تلاقی این دو بیضی دو نقطه به دست می‌آید که با توجه به شرایط مسأله، یکی از آنها موقعیت اصلی هدف موردنظر خواهد بود.

معمولاً این اندازه‌گیری به دلایل مختلف همراه با خطاهایی است که برای رفع این خطاها بایستی از ایستگاه مرجع استفاده نمود [4].

در روش دوم باید از یک ماهواره اصلی و دو ماهواره در مجاورت ماهواره اصلی استفاده نمود و ضمن محاسبه اختلاف زمان ورود سیگنال به گیرنده‌های زمینی، اختلاف فرکانس سیگنال ورودی به گیرنده‌های زمینی را نیز محاسبه کرد. در این مرحله نیز علاوه بر بردار موقعیت مکانی مربوط به TDOA، مجموعه نقاط مربوط به معادلات FDOA محاسبه و تشکیل یک خط را می‌دهند. در این روش نیز با تلاقی یان دو بردار می‌توان موقعیت فرستنده را مشخص کرد.

۳-۱- مقایسه دو روش

هرکدام از دو روش TDOA/TDOA و TDOA/FDOA دارای معایب و مزایایی هستند که به آنها اشاره می‌شود.

معایب و مزایای روش TDOA/TDOA

مزایا:

دقت خوب حتی بدون داشتن افریس

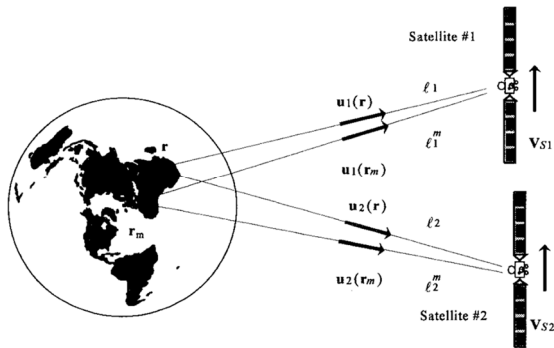
دقت خوب در همه زمان‌ها

قابل استفاده بدون مرجع (دقت متوسط)

قابل استفاده برای هدف‌های متحرک

¹ Differential Slant Range

² Differential Slant Range Rate



شکل ۲: هندسه موقعیت فرستنده و ماهواره‌ها [5]

البته باید دقت نمود که در شکل (۲) بردارها مربوط به موقعیت و سرعت بوده و نشان‌دهنده مسیر سیگنال نیستند. به‌وسیله روابط (۱) و (۲) می‌توان نشان داد که مسیر فراسو (آپ‌لینک) DSR و DSRR مرتبط با TDOA و FDOA هستند:

$$DSR = |\mathbf{r}_{S2} - \mathbf{r}| - |\mathbf{r}_{S1} - \mathbf{r}| = cTDOA_{uplink} \quad (1)$$

$$DSRR = \mathbf{v}_{S2} \cdot \mathbf{u}_2 - \mathbf{v}_{S1} \cdot \mathbf{u}_1 = -(c/f) FDOA_{uplink} \quad (2)$$

\mathbf{r} = بردار موقعیت تا منبع روی زمین

\mathbf{r}_{Si} = بردار موقعیت تا ماهواره i ($i=1,2$)

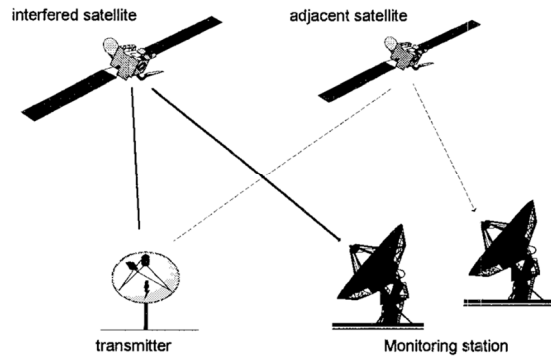
\mathbf{v}_{Si} = بردار سرعت تا ماهواره i

\mathbf{u}_i = بردار یکه (واحد) از نقطه تا \mathbf{r}_{Si}

c = سرعت نور؛ f = فرکانس سیگنال

$$\sigma = \frac{1}{|\sin \varphi|} \sqrt{\frac{\sigma_\ell^2}{L_t^2} + \frac{\sigma_v^2}{V_t^2}} \quad (3)$$

مشترک واقع در منطقه دید هر دو ماهواره، تعیین می‌شود.



شکل ۱: پیکربندی موقعیت فرستنده ماهواره‌ای [5]

شکل (۱) پیکربندی موقعیت فرستنده ماهواره‌ای و شکل (۲) هندسه موقعیت فرستنده را نشان می‌دهد. سیگنالی که از منبع در r تابش می‌شود، توسط دو ماهواره در موقعیت r_{S1} و r_{S2} دریافت می‌شود. سپس سیگنال توسط ماهواره‌ها به یک ایستگاه مانیتورینگ در r_m ارسال می‌شود.

۳-۴- تأثیر خطای TDOA/FDOA بر دقت موقعیت

تأثیر خطاهای TDOA/FDOA در تعیین DSR و DSRR شدیداً به هندسه موقعیت بستگی دارد که در معرض تغییرات مکانی و زمانی قرار دارد. از نظر ریاضی، می‌توان یک خطای موقعیت^۱ RMS در مقیاس km تعریف کرد و این مقدار را به خطاهای DSR و DSRR و از آنجا به خطاهای FDOA و TDOA مرتبط کرد. می‌توان نشان داد:

^۱ Root Mean Square

توضیح و تشریح متغیرها در رابطه (۳) عبارت است از:

خطای $\sigma_\ell = \text{DSR} \times \text{TDOA}$ خطای RMS مربوط به

فرکانس / خطای $\sigma_v = \text{DSRR} \times \text{TDOA}$ خطای RMS مربوط به

اندازه مؤلفه گرادیان DSR در صفحه آزیموت در نقطه r روی زمین $L_t =$

اندازه مؤلفه گرادیان DSRR در صفحه آزیموت $V_t =$

زاویه بین اجزای گرادیان DSR و DSRR در صفحه آزیموت = زاویه بین LOPها در سطح زمین در نقطه $r = \varphi$

با توجه به شکل (۲) گرادیان DSR و DSRR به صورت زیر خواهد بود:

$$\nabla \ell_{21}(\mathbf{r}) = -(\mathbf{u}_2 - \mathbf{u}_1) \quad (۴)$$

$$\nabla v_{21}(\mathbf{r}) = \frac{1}{\ell_2} [\mathbf{v}_{s2} - (\mathbf{v}_{s2} \cdot \mathbf{u}_2) \mathbf{u}_2] - \frac{1}{\ell_1} [\mathbf{v}_{s1} - (\mathbf{v}_{s1} \cdot \mathbf{u}_1) \mathbf{u}_1] \quad (۵)$$

$$\nabla = \mathbf{e}_x \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{e}_y \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{e}_z \frac{\partial}{\partial z} \quad (۶)$$

که در اینجا $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z$ بردارهای واحد در امتداد بردارهای متعامد x, y و z هستند. [5]

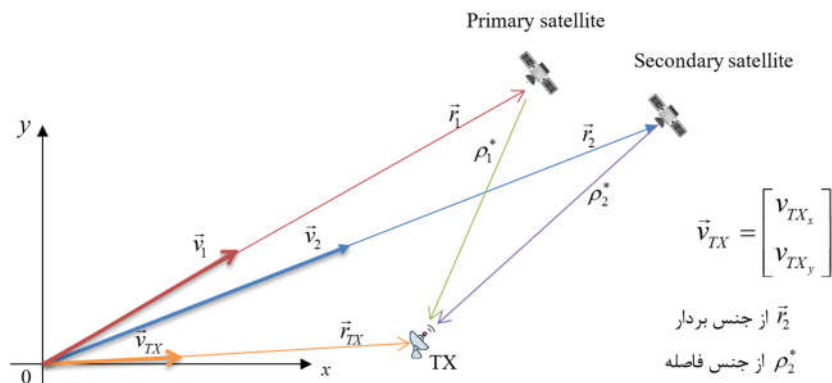
هدف است و در صورتی که هدف متحرک باشد؛ به علت اینکه در دستگاه معادلاتی که از معادلات TDOA و FDOA شکل می‌گیرد؛ تعداد مجهولات بیشتر از معلومات می‌شود؛ این دستگاه معادلات دارای جواب نخواهند بود.

البته در حالت متحرک بودن هدف، در صورتی که سرعت متحرک معلوم باشد، معادلات قابل حل بوده و جواب خواهند داشت؛ اما با توجه به اینکه خواسته مدنظر در این پژوهش محاسبه موقعیت، سرعت و مسیر حرکت هدف متحرک است؛ لذا سرعت هدف جزو مجهولات بوده و در حقیقت چالش اصلی نیز همین موضوع است.

۴- روش پیشنهادی

همانطور که در بخش قبلی اشاره شد؛ روش پیشنهادی کار حاضر برای موقعیت‌یابی، روش TDOA-FDOA خواهد بود؛ اما با دقت به معایب این روش متوجه محدودیت‌های آن می‌شویم. در این روش، هدف نباید متحرک باشد و از سوی دیگر به تعداد دو ماهواره جانبی نیاز خواهیم داشت. راه‌حل پیشنهادی برای فائق آمدن بر این محدودیت‌ها استفاده از فیلتر کالمن است. به بیان دیگر، بصورت همزمان از روش TDOA-FDOA و فیلتر کالمن استفاده خواهیم کرد.

شرط اینکه در روش مورد استفاده در این پژوهش، یعنی TDOA-FDOA جواب مطلوب باشد، ثابت بودن



شکل ۳: نمای موقعیت فرستنده، ماهواره اولیه و ماهواره ثانویه در صفحه مختصات

در شکل (۳) نمای موقعیت فرستنده، ماهواره اولیه^۱ و ماهواره ثانویه^۲ در صفحه مختصات نشان داده شده است. بردارهای \vec{V}_1 و \vec{V}_2 به ترتیب بردارهای سرعت ماهواره‌های اولیه و ثانویه، بردار \vec{V}_{TX} بردار سرعت ایستگاه گیرنده زمینی است که این بردار خود دارای دو مؤلفه در راستای x و y است. بردار \vec{r}_1 و \vec{r}_2 بردارهای مکان دو ماهواره اولیه و ثانویه و ρ_1^* و ρ_2^* فاصله بین ماهواره‌های اولیه و ثانویه تا ایستگاه گیرنده زمینی هستند.

نکته‌ای که باید در نظر داشت این که شکل (۳) فقط برای یکی از گیرنده‌ها رسم شده است و بردارهای مشابه تصویر فوق برای گیرنده دوم نیز باید در نظر گرفته شود. حال با توجه به شکل و فرض وجود گیرنده دوم، اختلاف زمان ورود سیگنال از فرستنده (هدف) به گیرنده‌های اول و دوم از رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$DTO = \frac{1}{c} [(\rho_2^* + \rho_2) - (\rho_1^* + \rho_1)] \quad (7)$$

حال با جای‌گذاری مقادیر، رابطه (۸) به صورت رابطه زیر قابل بازنویسی خواهد بود. اندیس k به معنای لحظه k ام است.

$$DTO_k = \frac{1}{c} [(\|\mathbf{r}_{Tx} - \mathbf{r}_2\| + \|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_{Rx_2}\|) - (\|\mathbf{r}_{Tx} - \mathbf{r}_1\| + \|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_{Rx_1}\|)] \quad (8)$$

همان‌طور که در رابطه (۸) مشاهده می‌شود، محاسبه DTO نیازی به خروجی‌های فیلتر کالمن ندارد. گرچه در حالت ایده‌آل، ماهواره‌های مدار GEO باید ثابت و کاملاً بی‌حرکت باشند؛ اما در عمل دارای حرکت جزئی و در نتیجه نسبت به زمین و هدف‌ها واقع روی آن دارای سرعت نسبی هستند، لذا این امر باعث ایجاد شیفت داپلر شده و فرکانسی که به گیرنده‌های زمینی می‌رسد، متفاوت خواهد بود. با توجه به این نکته، اختلاف فرکانس ورودی به گیرنده‌ها از رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

$$DFO = \frac{1}{c} [f_{Tx}^* \dot{\rho}_1^* + (f_{Tx}^* - f_{tr_1}) \dot{\rho}_1 - f_{Tx}^* \dot{\rho}_2^* + (f_{Tx}^* - f_{tr_2}) \dot{\rho}_2] \quad (9)$$

که در آن، f_{Tx}^* فرکانس حامل هدف، $\dot{\rho}_1^*$ سرعت نسبی بین ماهواره اولیه و هدف، $f_{Tx}^* - f_{tr_1}$ فرکانس *downlink* مربوط به ماهواره اولیه، $f_{Tx}^* - f_{tr_2}$ فرکانس *downlink* مربوط به ماهواره ثانویه، $\dot{\rho}_1$ سرعت نسبی گیرنده ۱ و ماهواره اولیه، $\dot{\rho}_2^*$ سرعت نسبی ماهواره ثانویه و هدف و $\dot{\rho}_1$ سرعت نسبی گیرنده ۲ و ماهواره ثانویه است.

$$\dot{\rho}_1^*(k) = \left(\left[\mathbf{v}_1 - \begin{bmatrix} v_{Tx_x}(k) \\ v_{Tx_y}(k) \\ v_{Tx_z}(k) \end{bmatrix} \right] \cdot \frac{\begin{bmatrix} PS_x \\ PS_y \\ PS_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Tx_x(k) \\ Tx_y(k) \\ Tx_z(k) \end{bmatrix}}{\sqrt{(PS_x - Tx_x(k))^2 + (PS_y - Tx_y(k))^2 + (PS_z - Tx_z(k))^2}} \right) \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)، \mathbf{v}_1 بردار سرعت ماهواره اولیه (PS) است. در پرانتز اول، چون دو بردار سرعت هم‌جهت هستند، از علامت تفریق استفاده شده است. با اینکه هدف سطحی و روی سطح آب است، اما در جهت Z جابجایی داریم، بنابراین مقدار متناظر آن در بردار سرعت هدف در جهت Z، غیرصفر در نظر گرفته شده است.

$$\dot{\rho}_1(k) = \left(PS \text{ Satellite velocity vector} - \vec{0}_{3 \times 1} \right) \cdot \frac{\begin{bmatrix} PS_x \\ PS_y \\ PS_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Rx_{1x} \\ Rx_{1y} \\ Rx_{1z} \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} PS_x \\ PS_y \\ PS_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Rx_{1x} \\ Rx_{1y} \\ Rx_{1z} \end{bmatrix}} \quad (11)$$

¹ Primary

² Secondary

یعنی متغیرهای $v_{Tx_x}(k)$ و $v_{Tx_y}(k)$ از پیش‌بینی سرعت‌های به‌دست‌آمده از طریق فیلتر کالمن یعنی $\hat{v}_{Tx_x}(k|k-1)$ و $\hat{v}_{Tx_y}(k|k-1)$ استفاده می‌کنیم؛ یعنی معادله (۷) دست‌نخورده باقی می‌ماند؛ اما در معادله (۸) به جای $\hat{\rho}_1^*$ و $\hat{\rho}_2^*$ از تخمین‌های آنها که توسط فیلتر کالمن به‌دست‌آمده، یعنی $\hat{\rho}_1^*$ و $\hat{\rho}_2^*$ استفاده می‌کنیم، لذا معادلات (۱۲) و (۱۳) را به فرم زیر خواهیم داشت:

$$\hat{\rho}_1^*(k) = \left(\left[\begin{array}{c} \mathbf{v}_1 - \left[\begin{array}{c} \hat{v}_{Tx_x}(k|k-1) \\ \hat{v}_{Tx_y}(k|k-1) \\ \hat{v}_{Tx_z}(k|k-1) \end{array} \right] \end{array} \right] \right) \frac{\left[\begin{array}{c} PS_x \\ PS_y \\ PS_z \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} Tx_x(k) \\ Tx_y(k) \\ Tx_z(k) \end{array} \right]}{\sqrt{(PS_x - Tx_x(k))^2 + (PS_y - Tx_y(k))^2 + (PS_z - Tx_z(k))^2}} \quad (12)$$

$$\hat{\rho}_2^*(k) = \left(\left[\begin{array}{c} \mathbf{v}_2 - \left[\begin{array}{c} \hat{v}_{Tx_x}(k|k-1) \\ \hat{v}_{Tx_y}(k|k-1) \\ \hat{v}_{Tx_z}(k|k-1) \end{array} \right] \end{array} \right] \right) \frac{\left[\begin{array}{c} SS_x \\ SS_y \\ SS_z \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} Tx_x(k) \\ Tx_y(k) \\ Tx_z(k) \end{array} \right]}{\sqrt{(SS_x - Tx_x(k))^2 + (SS_y - Tx_y(k))^2 + (SS_z - Tx_z(k))^2}} \quad (13)$$

و آخر، یک عدد به گام زمانی^۱ فعلی اضافه شده و مشاهدات جدید از گیرنده‌های ایستگاه زمینی ماهواره که همان $DTO(k+1)$ و $DFO(k+1)$ هستند، دریافت می‌شود. حال تمام مراحل فوق که برای لحظه k بیان شده بود برای لحظه $k+1$ تکرار می‌شود.

۵- مدل شبیه‌سازی

در این بخش خروجی شبیه‌سازی کد در حالت‌های مختلف نمایش داده می‌شود؛ اما لازم است در ابتدا توضیحاتی در مورد مسیر و موقعیت واقعی هدف ارائه دهیم.

برای طراحی مسیر حرکت از کارشناسان ناوبری دریایی استفاده شد. مسیری که برای حرکت در نظر گرفته شد؛ مطابق با یک سناریوی واقعی بود. هدف طوری انتخاب شد که دارای سرعت متوسط بوده و حدود ده ساعت از حرکت شناور مشاهده می‌شود. در طی این ده

رابطه (۱۱)، مربوط به محاسبه سرعت شعاعی مابین ماهواره PS و گیرنده اول (RX_1) است. چون گیرنده ثابت فرض می‌شود، به‌جای آن از بردار صفر ($\vec{0}_{3 \times 1}$) استفاده شده‌است.

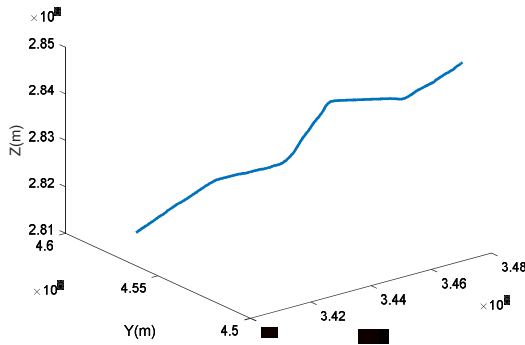
اگر سرعت هدف صفر و یا معلوم باشد، دو معادله فوق (DFO, DTO) با تابع fsolve قابل‌حل هستند و متغیر مجهول فقط موقعیت هدف یعنی \mathbf{r}_{Tx} خواهد بود. پس برای حذف مجهول سرعت هدف، از فیلتر کالمن کمک می‌گیریم و در فرمول (۱۰) به‌جای سرعت در زمان k ام،

$$\left[\begin{array}{c} PS_x \\ PS_y \\ PS_z \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} Tx_x(k) \\ Tx_y(k) \\ Tx_z(k) \end{array} \right]$$

با توجه به آنچه گفتیم، حال می‌توانیم فرایند انجام کار را بنویسیم. کد متلب اصلی برنامه نیز مطابق با همین فرایند نوشته شده‌است. این فرایند دارای ۶ مرحله است.

در مرحله اول اطلاعات DTO و DFO در لحظه k از گیرنده‌های ایستگاه زمینی ماهواره دریافت می‌شود. در مرحله دوم تخمین موقعیت هدف که توسط فیلتر کالمن به‌دست‌آمده، دریافت می‌شود. در مرحله سوم مقادیر حاصل از تخمین فیلتر کالمن، جایگزین مقادیر حاصل از اطلاعات دریافتی از گیرنده‌های ایستگاه زمینی ماهواره در فرمول‌های مربوط به محاسبه DTO و DFO می‌شود. در مرحله چهارم خروجی fsolve به‌صورت $GEO r_{Tx}(k)$ و $GEO r_{Ty}(k)$ در دسترس است. در مرحله پنجم، فیلتر کالمن با توجه به بردار مشاهدات حاصل از اطلاعات مرحله چهارم، دو خروجی مربوط به موقعیت و سرعت هدف را که یکی از آنها مربوط به فیلترینگ و دیگری مربوط به پیش‌بینی است را ارائه می‌دهد. در مرحله ششم

^۱ Time Step

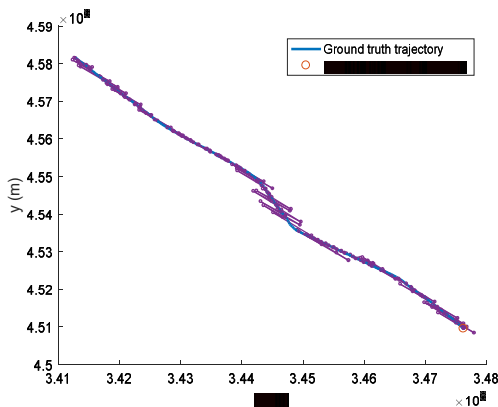


شکل ۴: ترسیم سه‌بعدی مسیر واقعی هدف

اطلاعات این نمونه‌ها در دسترس سیستم موقعیت‌یاب که بر مبنای تلفیق ماهواره GEO و فیلتر کالمن کار می‌کند، نیست. این نمونه‌ها را به کد متلب می‌دهیم تا بر مبنای آن TDOA و FDOA محاسبه و در دسترس سیستم موقعیت‌یاب قرار گیرد.

در کد متلب، تابع geolocation برای اینکه معادله fsolve را حل کند؛ یکی از پارامترهای ورودی که به آن نیاز دارد پیش‌بینی سرعت اولیه هدف است. در این پژوهش، حالت‌های مختلفی برای این پیش‌بینی در نظر گرفته شد که در ادامه به آن اشاره می‌شود.

در حالت اول که خروجی آن در شکل (۵) نشان داده شده است، پیش‌بینی اولیه سرعت هدف، همان پیش‌بینی سرعت توسط فیلتر کالمن است؛ در واقع این خروجی مربوط به کد اصلی برنامه است.



شکل ۵: خروجی کد اصلی برنامه به ازای سرعت پیش‌بینی شده توسط فیلتر کالمن

در کد اصلی برنامه، از سرعت پیش‌بینی شده توسط فیلتر کالمن استفاده شده و همان‌طور که در شکل (۵) مشخص است فیلتر کالمن توانسته است با دقت مناسبی موقعیت و سرعت هدف متحرک دریایی را تخمین بزند.

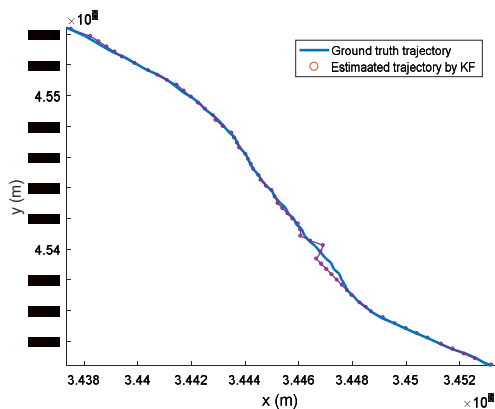
ساعت، از ۲۰۰ نقطه از مسیر حرکت این شناور نمونه‌برداری می‌کنیم.

موقعیت اولیه هدف یک نقطه در خلیج فارس با طول و عرض جغرافیایی (26.5893, 52.3741) در نظر گرفته شد. ابتدا فرض شد هدف با سرعت ۱۰ مایل دریایی و با راه ۱۲۰ از موقعیت اولیه حرکت و بعد از مدت دو ساعت به نقطه‌ای با طول و عرض جغرافیایی (26.5062, 52.5380) می‌رسد. در مرحله بعد با سرعت ۱۲ مایل دریایی و با راه ۹۰ از موقعیت نقطه دوم حرکت نموده و به نقطه‌ای با طول و عرض جغرافیایی (26.5074, 52.7591) می‌رسد. سپس با سرعت ۱۲ مایل دریایی و با راه ۱۴۰ از موقعیت نقطه سوم حرکت نموده و به نقطه چهارم با طول و عرض جغرافیایی (26.3550, 52.8992) می‌رسد. در گام بعدی با سرعت ۱۰ مایل دریایی و با راه ۱۰۰ از موقعیت نقطه چهارم حرکت نموده و به نقطه‌ای با طول و عرض جغرافیایی (26.3267, 53.0846) می‌رسد. در آخرین مرحله با سرعت ۱۰ مایل دریایی و با راه ۱۲۰ از موقعیت نقطه پنجم حرکت نموده و به نقطه پایانی مسیر حرکت خود با طول و عرض جغرافیایی (26.2442, 53.2452) می‌رسد.

سپس با استفاده از نرم‌افزار، این نقاط بر روی نقشه مشخص گردیده و با دادن اطلاعات مربوط به سرعت و موقعیت‌های شش‌گانه مشخص شده، سایر نقاط یعنی ۲۰۰ نقطه استخراج گردید. در قسمت بعد از طراحی مسیر حرکت شناور، محاسبات لازم برای تبدیل طول و عرض جغرافیایی موقعیت‌های موردنظر انجام و موقعیت این ۲۰۰ نقطه در دستگاه مختصات دکارتی به صورت X, Y و Z مشخص گردید.

در مرحله بعد با معلوم بودن نقاط و سرعت هدف متحرک، در بازه‌های تعیین شده، سرعت هدف در سه راستای X, Y و Z تعیین گردید. بعد از تکمیل شدن بانک اطلاعات مسیر و سرعت هدف، این اطلاعات به‌عنوان موقعیت و سرعت واقعی هدف در قالب یک mat-file به کد اصلی برنامه اعمال شد.

شکل (۴) مربوط به ترسیم مسیر حرکت واقعی هدف با توجه با اطلاعات اعمال شده به کد متلب برنامه است که موقعیت هدف را در سه راستای X, Y و Z نشان می‌دهد.



شکل ۸: خروجی به ازای سرعت واقعی هدف با تمرکز بر بخش میانی نمودار

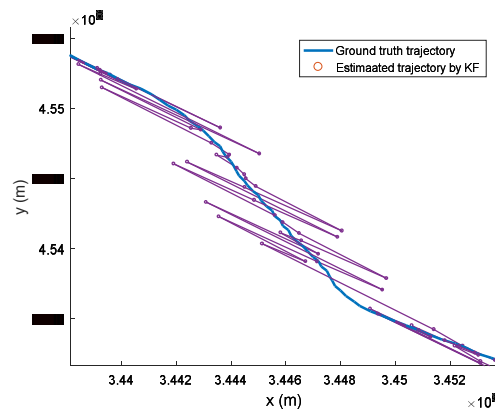
۶- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش، موقعیت‌یابی یک هدف متحرک با استفاده همزمان از ماهواره‌های GEO و فیلتر کالمن انجام شد. موقعیت‌یابی هدف متحرک دریایی با تأکید بر استفاده از ماهواره‌های GEO در دستورکار قرار گرفت. موقعیت‌یابی با ماهواره‌های GEO را با روش‌های متعددی می‌توان انجام داد. روش پیشنهادی ما استفاده همزمان از تکنیک TDOA و FDOA است. استفاده همزمان این دو تکنیک چالش‌هایی را به همراه دارد؛ از جمله اینکه نباید هدف متحرک باشد و به جز ماهواره اصلی نیاز به دو ماهواره فرعی است. برای فائق آمدن بر این محدودیت‌ها، روش پیشنهادی ما استفاده از فیلتر کالمن است.

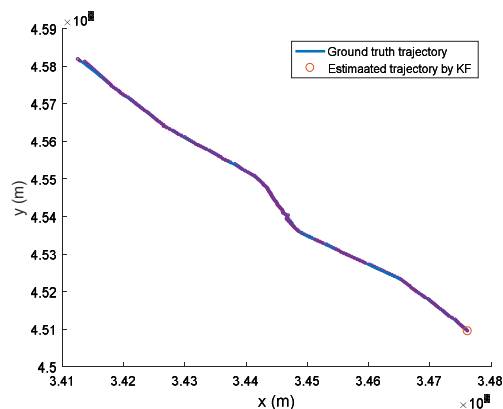
روش کار در این پژوهش، به این صورت بوده‌است که ابتدا فیلتر کالمن یک تخمین اولیه از موقعیت هدف که ممکن است چندان صحیح هم نباشد را به سیستم موقعیت‌یابی می‌دهد. سیستم موقعیت‌یابی برای حل معادلات TDOA-FDOA نیاز به این مقدار اولیه دارد. در این مرحله سیستم موقعیت‌یابی معادلات مربوطه را حل نموده و موقعیت به‌دست‌آمده را به‌منظور به‌روزرسانی اطلاعات، به فیلتر کالمن می‌دهد. این سیکل به همین ترتیب ادامه می‌یابد و در هر مرحله فیلتر کالمن اطلاعات سرعت و موقعیت هدف را به‌روز می‌کند. انجام این مراحل، در ۲۰۰ گام زمانی انجام شد و در نهایت تصویری از تخمین موقعیت و سرعت هدف ارائه شد.

سیستم موقعیت‌یابی به مقدار اولیه سرعت هدف بسیار حساس است؛ بنابراین در این پژوهش دو حالت مختلف برای تعیین این مقدار اولیه در نظر گرفته شد. این حالت‌ها

برای اینکه جزییات این نمودار با دقت بیشتری قابل مشاهده باشد؛ بخشی از این نمودار به‌صورت شکل (۶) با تمرکز بر بخش میانی نمودار نمایش داده شده‌است.



شکل ۶: خروجی کد اصلی با تمرکز بر بخش میانی نمودار خروجی بعدی مربوط به حالتی است که به‌جای استفاده از سرعت پیش‌بینی‌شده توسط فیلتر کالمن، مقادیر سرعت واقعی را به معادلات DFO و DTO بدسیم. این خروجی در شکل (۷) نشان داده شده‌است.



شکل ۷: خروجی به ازای سرعت واقعی هدف

همان‌طور که در شکل (۷) مشخص است با توجه به اینکه سرعت واقعی هدف به‌عنوان پیش‌بینی از سرعت هدف داده شده، فیلتر کالمن توانسته با دقت بسیار خوبی خروجی را تخمین بزند. برای اینکه جزییات این نمودار با دقت بیشتری قابل مشاهده باشد؛ بخشی از این نمودار به‌صورت شکل (۸) با تمرکز بر بخش میانی نمودار نمایش داده شده‌است.

عبارت بودند از: سرعت پیش‌بینی‌شده توسط فیلتر کالمن و سرعت واقعی هدف. در هر دو حالت، مقدار اولیه موقعیت هم همان مقدار پیش‌بینی‌شده توسط فیلتر کالمن در نظر گرفته‌شد.

با استناد به نتایج حاصله از شبیه‌سازی می‌توان گفت که فیلتر کالمن توانسته‌است با دقت مناسبی موقعیت و سرعت هدف متحرک دریایی را تخمین بزند. این تخمین تا حد زیادی به سرعت و موقعیت واقعی هدف مطابقت داشت. همین نتایج نشان داد که اگر به عنوان پیش‌بینی سرعت هدف، سرعت واقعی هدف به کد داده‌شود؛ تخمین موقعیت توسط فیلتر کالمن، تخمین بسیار دقیق و تقریباً منطبق بر مسیر حرکت واقعی هدف متحرک دریایی خواهد بود.

مراجع

- [1] K. C. Ho and Y. T. Chan, "Geolocation of a known altitude object from TDOA and FDOA measurements," *IEEE transactions on aerospace and electronic systems*, vol. 33, no. 3, pp. 770-783, 1997.
- [2] D. Haworth, N. G. Smith, R. Bardelli and T. Clement, "Interference localization for EUTELSAT satellites-the first european transmitter location system," *International Journal of satellite communications*, vol. 15, no. 4, pp. 155-183, 1997.
- [3] H. Yan, J. K. Cao and L. Chen, "Study on location accuracy of Dual-Satellite Geolocation system," in *IEEE 10th International Conference on Signal Processing Proceedings*, IEEE, 2010.
- [4] C. Liu, L. Yang and L. Mihaylova, "Dual-satellite source geolocation with time and frequency offsets and satellite location errors," in *2017 20th International Conference on Information Fusion (Fusion)*, IEEE, 2017.
- [5] R. Bardelli, D. Haworth and N. Smith, "Interference Localization for The Eutelsat Satellite System," *IEEE*, vol. 3, pp. 1641-1651, 1995.