«علوم و فناوری‌های پدافند نوین»
سال پانزدهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۳؛ ص ۸۴-۷۷

مکان‌یابی پهپادها با استفاده از ماهواره‌های زمین آهنگ با استخراج تابع ابهام متقابل مبتنی بر روش FDOA/TDOA

فاطمه جلالی[۱]، محمدحسین مدنی[۲*]

۱- دانشجوی دکتری، ۲- استاد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۶، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۲۶، ، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۰، انتشار: ۱۴۰۳/۰۶/۰۱)
DOR: https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26762935.1403.15.2.2.1

چکیده

با توجه به ارتباط پایانه پهپادهای دوربرد متخاصم با ماهواره‌های زمین آهنگ جهت انجام مأموریت محوله، سناریوی مکان‌یابی براین اساس طرح‌ریزی‌شده است. در این مقاله هدف، مکان‌یابی غیرفعال این پهپادها با استفاده از روش Geolocation مبتنی بر استخراج تابع ابهام متقابل با در نظر گرفتن پارامترهای TDOA/FDOA است. براین مبنا با سناریوی مبتنی بر دو ماهواره GEO (موسوم به ماهواره‌های اولیه و ثانویه) و تعبیه سه گیرنده زمینی در مکان‌های تعیین‌شده و مدل‌سازی سیگنال‌های دریافتی با استفاده از خواص تا خیرات زمانی و شیفت داپلر، مکان‌یابی صورت پذیرفته است. بدین منظور با وارد نمودن پارامترهای زمانی و فرکانسی در سیگنال‌های مدل‌سازی شده، اقدام به حل تابع ابهام متقابل سیگنال‌های باز ارسالی ماهواره‌ها که توسط گیرنده‌های زمینی دریافت شده‌اند، گردیده است. هدف این مقاله، یافتن روش‌های مناسب برای مکان‌یابی غیرفعال اهداف متحرک هوایی است. بدین منظور، با استفاده از روش تابع ابهام متقابل، محاسبه موقعیت هدف مبتنی بر TDOA و FDOA معرفی و بررسی می‌شود. این روش‌ها متناسب با اطلاعاتی است که از اندازه‌گیری‌های انجام‌شده بر روی سیگنال‌های دریافتی به‌دست‌آمده است و همچنین معیارهای مناسب برای مقایسه این روش‌ها ارائه می‌گردد. درروش پیشنهادی مدل‌سازی بر اساس دو گیرنده زمینی و یک گیرنده مرجع صورت گرفته است که در مقایسه با روش‌های مکان‌یابی ارائه‌شده برای هدف زمینی با تعداد بیش از سه گیرنده و دو ماهواره به‌صورت هم‌زمان، از پیچیدگی کمتری برخوردار است و در SNRهای مختلف بهبود عملکرد خود را حفظ کرده است. با انجام شبیه‌سازی، مقدار پیک تابع ابهام که نشان‌دهنده محل تلاقی معادلات TDOA، FDOAو معرف مکان هدف است محاسبه گردید. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده نشان‌دهنده بهبود دقت مکان‌یابی و رسیدن به باند کرامر- رائو است. روش پیشنهادی پیچیدگی محاسباتی را در مقایسه با روش‌های موجود تا ۳۰٪ کاهش داده و درSNR نزدیک به ۶ دسی‌بل، دقت مکان‌یابی را به ترتیب تا ۱,۵ برابر بهبود می‌بخشد.

کلیدواژه‌ها: مکان‌یابی، ماهواره، Geolocation، تابع ابهام، TDOA، FDOA.

UAVs Localization Utilizing Geostationary Satellites through Cross Ambiguity Function Extraction Based on FDOA/TDOA Techniques

F. Jalali*, M. H. Madani
Malek-e- Ashtar University, Tehran, Iran
(Received:2024/06/15, Revised: 2024/07/16, Accepted: 2024/08/10, Published: 2024/08/22)

Abstract

Regarding the connection of the terminal of hostile long-range UAVs with satellites of the ground in order to carry out the assigned mission, the positioning scenario has been planned accordingly. In this article, the aim is to passively locate these UAVs using the geolocation method based on extracting the cross ambiguity function by considering the TDOA/FDOA parameters. For this basis, positioning has been done with a scenario based on two GEO satellites (called primary and secondary satellites) and the installation of three ground receivers in designated locations and the modeling of the received signals using the properties of time delays and Doppler shift. For this purpose, by entering the time and frequency parameters in the modeled signals, the cross ambiguity function of the satellite signals received by the ground receivers has been solved. The purpose of this article is to find suitable methods for passive localization of moving aerial targets. For this, by using the method of cross ambiguity function, the target position calculation based on TDOA and FDOA is introduced and investigated. These methods are proportional to the information obtained from the measurements made on the received signals, and appropriate criteria are also provided for comparing these methods. In the proposed method, modeling is based on two ground receivers and one reference receiver. This approach has significant advantages compared to other localization methods that typically use more than three receivers and two satellites simultaneously and, its improvement in different SNR. By performing the simulation, the peak value of the ambiguity function, which indicates the intersection of the TDOA, FDOA and target location equations, was calculated. The results of the performed simulations show the improvement of positioning accuracy and reaching the Cramer-Rao band.

Keywords: Localization, Satellite, Geolocation, Ambiguity function, FDOA, TDOA.

*Corresponding Author E-mail: mh_madani@aut.ac.ir

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر نیاز به وجود سرویس‌هایی که بتوانند موقعیت دقیق افراد یا اجسام را شناسایی کنند، بسیار فزاینده بوده است که همین مسئله منجر به توسعه و تکامل سریع دستگاه‌های مکان‌یابی شده است. در حالت کلی دستگاه‌های مکان‌یابی به دودسته تقسیم می‌شوند که بر اساس نوع سیگنال و پردازش آن، مکان‌یابی مستقیم (فعال) و مکان‌یابی غیرمستقیم (غیرفعال) نام‌گذاری می‌شوند [۱]. در دسته نخست، مشخصات شرط مرزی هندسی اهداف، مستقیماً از روی سیگنال‌های دریافتی استخراج می‌شود؛ درحالی‌که در دسته دوم، ابتدا تعدادی اندازه‌گیری از روی سیگنال‌های دریافتی محاسبه‌شده و سپس با استفاده از آن‌ها موقعیت اهداف تخمین زده می‌شود. مکان‌یابی مستقیم نسبت به دسته دوم دارای برتری‌هایی هستند که مهم‌ترین آن‌ها دقت عملکرد بهتر است. بااین‌وجود، این روش‌ها برای تخمین موقعیت اهداف نیازمند جستجو در فضای چندبعدی هستند و همین امر موجب شده است که به دلیل پیچیدگی زیاد در عمل کاربرد چندانی نداشته باشند. در سیستم مکان‌یابی غیرفعال، چند گیرنده که در نقاط جغرافیایی مختلف قرار گرفته‌اند، سیگنال‌های منتشرشده از هدف را جمع‌آوری می‌کنند. این سیگنال‌ها می‌تواند پالس‌های ارسالی یک رادار هوایی یا سیگنال‌های مخابراتی یا ناوبری یک فرستنده مخابراتی موجود در سیستم موقعیت‌یابی باشد. صرف‌نظر از نوع سیگنال دریافتی، در این دستگاه‌ها زمان دقیق ارسال سیگنال توسط هدف مشخص نیست.بنابراین برخلاف دستگاه‌های موقعیت‌یابی مبتنی بر رادار معمول و رایج، فاصله مشخص نیست.

ماهواره‌های هم‌زمان که به آن‌ها ماهواره‌های ژنو نیز گفته می‌شود، دور کره زمین را در ۲۴ ساعت طی می‌کنند ازاین‌رو، آن‌ها از زمین مانند ایستگاه‌های ثابتی به نظر می‌آیند که به فاصله عمودی حدود ۳۶۰۰۰ کیلومتر بالای همان نقطه از زمین قرارگرفته‌اند. علاوه بر این، بالا بودن ارتفاع مدار هم‌زمان، چنین ماهواره‌ای را از۴۰درصد سطح کره زمین قابل‌مشاهده می‌سازد. بنابراین استفاده از این ماهواره‌ها برای تشخیص اهداف متحرک هوایی که سقف پروازی بالایی دارند، بسیار مؤثر است، زیرا سطح پوشش بسیار وسیعی را نسبت به سایر ماهواره‌های مدار پایین‌تر دارند.

هم‌زمان با گسترش فنّاوری‌های مرتبط با مخابرات ماهواره‌ای تا به امروز تحقیقات بسیاری در این زمینه صورت گرفته است. حتی استانداردهای مخابراتی برای استفاده از این دستگاه‌ها در ابعاد مختلف وضع‌شده است که برای مطالعه بیشتر می‌توان به [۱] مراجعه کرد. پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه مکان‌یابی با استفاده از مخابرات ماهواره‌ای ابعاد متنوعی دارد که هرکدام به بررسی و تحلیل بخش‌های خاصی ازنظر نرم‌افزاری یا سخت‌افزاری پرداخته‌اند. ولی برای انسجام بهتر مطالب پژوهش‌های انجام‌شده تاکنون با سه رویکرد کلی دسته‌بندی و بیان می‌شوند. در دسته نخست، منابع پیرامون تحلیل باندهای فرکانسی و چالش‌های تداخل سیگنال در مسائل مکان‌یابی می‌پردازند.

باندهای فرکانسی مورداستفاده را درروش مکان‌یابی با دو ماهواره ژنو بررسی و چالش‌ها و مزایای استفاده از باندهای مورداستفاده تشریح و تداخل‌هایی که بین سیگنال‌های ماهواره‌ای وجود دارد بررسی و تحلیل شده است[۲ و ۳]. در دسته دوم فن‌های مکان‌یابی و تخمین موقعیت برای غلبه بر مشکلات تداخل سیگنال‌ها که کیفیت مکان‌یابی را تحت تأثیر قرار می‌دهد موردبررسی قرارگرفته‌اند[۴ و ۵]. فن‌های TDOA, FDOA همراه با دو ماهواره ژنو پیشنهاد شده که البته سناریوی در نظر گرفته‌شده در این حالت یک فرستنده ساکن زمینی است. در برخی گزارشات [۶ ، ۷ و ۸]، سناریوهای مختلفی برای فرستنده زمینی با سرعت ثابت در نظر گرفته شده و برای تشخیص هدف از روش آشکارسازی با تابع درست نمایی بیشینه استفاده شده است اما فقط وجود هدف مشخص می‌گردد و موقعیت هدف استخراج نمی‌شود. روش جبری برای حل معادلات غیرخطی و هذلولوی TDOA, FDOA ارائه‌شده است [۹] که البته نتایج شبیه‌سازی آن به دلیل غیر محدب بودن مسئله تا حدCRLB تقریباً فاصله دارد.

در گزارش دیگری [۱۰]، هدف متحرک زمینی در نظر گرفته شده و با استفاده از دو ماهواره ژنو و استفاده از روش کلاسیک همبستگی سیگنال‌های TDOA, FDOA، تخمین موقعیت هدف به انجام رسیده است. در این روش با افزایش بازه زمانی مشاهدات، کیفیت سیستم بسیار کاهش می‌یابد. در دسته سوم، پژوهش‌ها با محوریت بهینه‌سازی و حل معادلات برای سناریوهای ترسیم‌شده قبلی است و نوآوری در پیاده‌سازی سناریو ارائه نمی‌گردد. برای مثال در یکی از گزارشات [۱۱]، روش جدیدی پیشنهاد شده که در آن سیگنال را به بازه‌های کوچک‌تر زمانی تقسیم می‌کند و در هر بازه FDOA و نرخ تغییرات آن را بررسی و بعد از ارائه الگوریتم‌هایی برای بهبود دقت در تخمین مسئله، پارامترهای مدنظر را استخراج می‌کند. هرچند دقت این روش نسبت به حل توأم TDOA, FDOA پایین‌تر است،

هم‌چنین دربرخی گزارشات دیگر [۱۲ و ۱۳]، بررسی کیفیت مکان‌یابی باTDOA, FDOA, AOA صورت گرفته است. گزارشات دیگری نیز با تأکید بر استفاده از اطلاعات مربوط به‌سرعت و مکان استقرار ماهواره‌ها برای افزایش دقت مکان‌یابی با خطی سازی معادلات TDOA, FDOA ، موقعیت مکانی یک فرستنده زمینی را استخراج می‌کند که البته مباحث ریاضی و جبری بسیار پیچیده و سنگینی را در برمی‌گیرد [۱۴ و ۱۵]. درنتیجه، طراحی تخمین

گرهای مناسب برای مکان‌یابی هدف متحرک با پیچیدگی کم و عملکرد بهینه، یکی از زمینه‌هایی است که تاکنون پاسخی برای آن ارائه نشده است.

در این مقاله هدف مکان‌یابی غیرمستقیم اهداف متحرک هوایی با ارائه یک سناریو از المان‌های مختلف مخابراتی است و نوآوری اصلی ، تشخیص و تعیین موقعیت یک هدف متحرک هوایی با استفاده از سیگنال‌های دریافتی از ماهواره‌های مدار ژئو است.

بنابراین با توجه به مسائلی که تاکنون ذکر شد حوزه مکان‌یابی مدنظر، بر اساس سامانه‌های مکان‌یاب محلی با روش‌های غیرفعال و استفاده از ماهواره‌های مخابراتی ژئو است که با توجه به ویژگی‌های منحصربه‌فردشان نسبت به ماهواره‌های سایر مدارها موردتوجه قرارگرفته‌اند بنابراین با بررسی و جمع‌بندی پیشینه تحقیق، ابعاد نوآوری مقاله از دو رویکرد قابل‌بیان خواهد بود. نخست طراحی سناریو با استفاده از دو ماهواره در مدار ژئو و هم‌چنین هدف متحرک، و رویکرد دوم، مدل‌سازی سیگنال‌ها و تحلیل‌های ریاضی روابط و معادلات حاکم بر سناریوی مدنظر است. این مقاله روشی نوآورانه برای مکان‌یابی غیرفعال پهپادهای متخاصم ارائه می‌دهد که با استفاده از دو ماهواره GEO، سیگنال‌های لوب کناری را برای تخمین دقیق موقعیت و سرعت هدف بهره‌برداری می‌کند. نوآوری اصلی در ترکیب سناریوی هدف‌گذار هوایی، بهینه‌سازی محاسباتی با تابع ابهام متقابل (CAF)و تبدیل فوریه گسسته(DFT) ، و کاهش تعداد گیرنده‌های زمینی به دو گیرنده و یک مرجع نهفته است، که دقت بالا، پایداری در SNR پایین، و کاربرد عملی را تضمین می‌کند.

در این مقاله به بررسی و تحلیل روش CAF[1] برای مکان‌یابی هدف متحرک می‌پردازیم، به‌طوری‌که چالش‌های غیرخطی و غیر تحدب الگوریتم تخمین را می‌توان برطرف کرد. علاوه بر این، الگوریتم CAF قادر به آشکارسازی سیگنال‌های ارسالی با مدولاسیون‌ها و پهنای باند متفاوت خواهد بود. بنابراین نوآوری مقاله از دو رویکرد قابل‌توجه است، الف) ازنظر سناریو و نوع چینش المان‌ها ب) مدل‌سازی سیگنال‌ها و معادلات و روابط حاکم بر مسئله برای مکان‌یابی هدف متحرک مدنظر. در این مقاله، ابتدا سیگنال‌های دریافتی را مدل‌سازی کرده سپس با قیدها و ملاحظات در نظر گرفته‌شده، با روش تابع ابهام متقابل همبستگی آن‌ها را محاسبه گردیده است. برای دقت مکان‌یابی بالاتر و خطای کمتر در طول بازه زمانی مشاهدات، برای حل تابع به‌دست‌آمده از روش تبدیل فوریه گسسته استفاده‌شده است. بعد از اعمال این روش بر روی تابع به‌دست‌آمده، نقطه پیک تابع ابهام که نشان‌دهنده مقادیرTDOA ، FDOAدر دو بعد زمانی و فرکانسی است، مشخص می‌شود. با به دست آمدن نقطه پیک تابع که نشان‌دهنده تلاقی توابع اختلاف‌زمان و فرکانس رسیدن سیگنال است، مکان هدف استخراج می‌شود. نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی بهبودیافته را تأیید می‌کند. علاوه بر این، روش CAF می‌تواند دقت موقعیت‌یابی را که مستقیماً با وضوح طیفی تبدیل فوریه گسسته (DFT) مرتبط است، بهبود بخشد. هم‌چنین برخلاف روش‌های تخمین سیگنال مرسوم، نیازی به حل معادلات زمانی و فرکانسی از مراتب بالاتر و پیچیده نخواهد بود.

در ادامه ابتدا در قسمت دوم مدل سیستم و سناریوی طراحی‌شده بیان خواهد شد. سپس در قسمت سوم، معادلات و روابط حاکم بر سیستم و روش‌های مکان‌یابی مرتبه دوم تشریح و با استفاده از معادلات استخراج‌شده در قسمت چهارم روش پیشنهادی ارائه می‌گردد. در بخش‌های پنجم و ششم به ترتیب تحلیل نتایج روش تابع ابهام متقابل به‌دست‌آمده و صحت سنجی اعتبار روابط به‌وسیله شبیه‌سازی مونت‌کارلو با متلب ارائه می‌گردد.

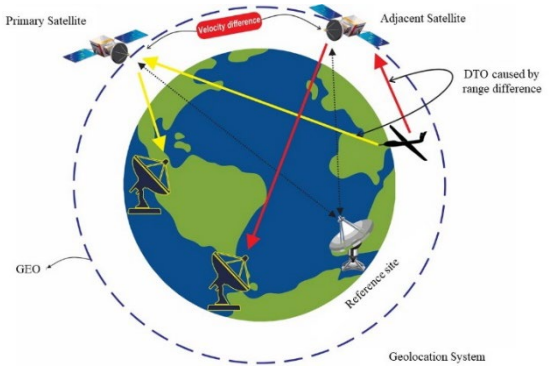
۲. مدل و سناریوی سیستم

طبق مسائل مطرح‌شده تاکنون آنچه در مقاله پیش رو به‌عنوان ابعاد و حدود مسئله موردتوجه است، انتخاب نوع الگوریتم مناسب، استخراج روش شناسایی و مکان‌یابی برای بهبود مسائل آشکارسازی و تشخیص هدف و انجام عملیات مکان‌یابی است. با توجه به این‌که نوع هدف انتخابی در این مقاله هدف متحرک هوایی(پهپاد) است، تعریف و هدف اصلی موضوع به‌طورکلی این‌گونه مطرح می‌شود: مکان‌یابی غیرفعال اهداف متحرک هوایی عبارت است از به دست آوردن مکان و سرعت هدف با استفاده از سیگنال منتشرشده توسط خود هدف به ماهواره‌های ژئو و استخراج پارامترهای آن.

سناریوی مکان‌یابی موردنظر شامل یک سایت گیرنده زمینی با مختصات معلوم، یک هدف متحرک هوایی(پهپاد) و دو ماهواره در مدار ژئو (ماهواره اولیه و ثانویه یا سایه) مدل‌سازی شده است که هدف اصلی، مکان‌یابی هدف با استفاده از اختلاف‌زمانی رسیدن سیگنال و اختلاف شیفت داپلر سیگنال‌های دریافتی است. در سناریوی مدنظر، هدف متحرک یا همان فرستنده سیگنال تداخلی، سیگنال خود را به ماهواره اولیه ارسال می‌کند که لوب اصلی سیگنال را ماهواره اولیه دریافت و لوب‌های کناری توسط ماهواره ثانویه(سایه) دریافت می‌شود. لازم به ذکر است که در این‌گونه سناریوها، در حالت کلی سیگنال‌های تداخلی و شناسایی باند باریک هستند و هر دو ماهواره با سرعت یکسان در یک‌جهت حرکت می‌کنند. هم‌چنین دو سایت گیرنده زمینی برای آشکارسازی و شناسایی سیگنال باز ارسالی از ماهواره‌ها در موقعیت جغرافیایی مشخص تعبیه‌شده‌اند.

1. Cross Ambiguity Function

دقت مکان‌یابی در این روش وابسته به صحت و دقت پردازش‌های مکانی و عدم خطای مکانی در سایت‌های گیرنده و ماهواره‌ای است که برای رسیدن به این نتیجه، یک سایت مرجع زمینی برای ارسال سیگنال به ماهواره‌ها و پردازش آن‌ها در نظر گرفته می‌شود که جانمایی این سایت مرجع بسیار حائز اهمیت است به‌طوری‌که هرگونه خطا یا عدم دقت در تعیین موقعیت جغرافیایی آن منجر به ایجاد بایاس در تخمین موقعیت می‌شود. البته ازنظر پردازشی و نوع سیگنال نیز باید فرکانس مرکزی آن بسیار دقیق و مناسب تنظیم شود. در صورت وجود چنین شرایطی دقت مکان‌یابی با روش ماهواره دوگانه نسبت به روش‌های دیگر بالاتر خواهد بود. با توجه به توضیحات داده‌شده و شرایط ذکرشده، سناریوی مسئله مکان‌یابی به‌صورت شرط مرزی هندسی، به شکل (۱) خواهد بود.



شکل ۱- سناریوی موردنظر در ره‌گیری هدف متحرک

برای شفاف‌تر شدن موضوع و مقایسه بهتر آن با روش‌های موجود در منابع موجود، ویژگی‌ها و ابعاد مسئله و سناریوی این مقاله در جدول(۱) آورده شده است.

جدول (۱)- کلیات سناریوی در دست بررسی

سناریوی مکان‌یابی و تخمین موقعیت اهداف	
نوع هدف	متحرک- هوایی (ترمینال‌های منصوب بر پهپاد)
ماهواره‌های مورداستفاده	دو ماهواره(GEO-GEO)
الگوریتم حل مسئله	TDOA-FDOA
چینش گیرنده‌های زمینی	دو سایت گیرنده در مکان معلوم و یک سایت مرجع برای کالیبراسیون
نوع مشاهدات	مشاهدات و سیگنال‌های دریافتی از سایت‌های گیرنده زمینی

روش موقعیت‌یابی با استفاده از دو ماهواره[1] در برخی پژوهش‌های گذشته نیز بررسی‌شده است. اما نکته قابل‌توجه اینجاست که در این پژوهش‌ها ماهواره‌های در نظر گرفته‌شده یا در دو مدار جداگانه هستند یا در مدار یکسان ولی مدارهای سطح پایین[2] قرارگرفته‌اند ولی در سناریوی در دست بررسی، هر دو ماهواره در دو مدار یکسان . مدار بالاتر از LEO قرار دارند، که همین تفاوت باعث پوشش گسترده ماهواره‌ها[3] در حوزه مورد پایش و نامحسوس بودن[4] پایش و هم‌چنین فعالیت در گستره وسیعی از طیف فرکانسی شود که خود نسبت به روش‌های پیشین، یک مزیت اساسی محسوب می‌شود. لازم به ذکر است در ارتفاع مدار هم‌زمان با زمین، سرعت مداری ماهواره برابر با سرعت یک نقطه از استوای زمین است و ارتفاع هم‌زمان با زمین به‌راحتی می‌تواند محاسبه شود. از دید کاربر روی سطح زمین نیز این ماهواره‌ها نسبت به زمین ساکن به نظر می‌رسند زیرا که دارای سرعت ثابت و برابر با زمین هستند. در ادامه روش‌های مورداستفاده برای مکان‌یابی هدف موردبررسی قرار می‌گیرند.

۳-روابط حاکم و روش حل مسئله

۳-۱ روش‌های مکان‌یابی مرتبه دوم

روشی بسیار دقیق برای مکان‌یابی، اندازه‌گیری اختلاف‌زمان ورود سیگنال (TDOA[5]) به حسگرهای مختلف است که منحنی‌های درجه دوم تولید می‌کند که به آن خط مکان (LOP[6]) گفته می‌شود؛ یعنی خطوطی که هدف روی آن قرار دارد. از تقاطع این LOP ها برای تخمین موقعیت استفاده می‌گردد.

از اختلاف فرکانس ورود (FDOA[7]) سیگنال به حسگرها نیز می‌توان برای مکان‌یابی استفاده کرد. منحنی‌های حاصل از معادلات این روش نیز به فرم درجه دوم است ولی از روش دیگر پیچیده‌تر است.

سیگنال منتشرشده از یک شی متحرک دارای اثر داپلر است که خود را به‌صورت اختلاف فرکانس نشان می‌دهد و متناسب است با جهت حرکت جسم نسبت به گیرنده. با اندازه‌گیری این اختلاف فرکانس دریافتی در حسگرهای مختلف می‌توان مکان هدف را تخمین زد. برای استفاده از این روش تنها کافی است یکی از اجزاء مسئله متحرک باشد- یک یا چند حسگر یا هدف- و با افزایش تغییرات داپلر دقت اندازه‌گیری نیز افزایش خواهد یافت.

وقتی سرعت حسگر یا هدف خیلی کمتر از سرعت نور (c) باشد اختلاف فرکانس بدین‌صورت محاسبه می‌گردد:

$$\tau^{\circ} = \frac{f_0}{c}(v_2 - v_1) \qquad (۱)$$

1. Dual Satellite

2. Low Earth Orbit
3. Wide Coverage
4. Invisibility
5. Time Difference of Arrival
6. Line of Position
7. Frequency Difference of Arrival

که در رابطه فوق v_i سرعت لحظه‌ای و شعاعی گیرنده‌ها نسبت به فرستنده را نمایش می‌دهد. و τ°، همان اختلاف فرکانس داپلر (FDOA) است. ازآنجاکه اختلاف دو سرعت مشتق زمانی فاصله‌ها را نشان می‌دهد، رابطه ۱ را می‌توان به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$\tau^{\circ} = \frac{f_0}{c}\left(\frac{dr_2}{dt} - \frac{dr_1}{dt}\right) \quad (۲)$$

که r، فاصله بین فرستنده و گیرنده است. بنابراین مشتق فاصله نسبت به زمان، بیانگر سرعت تغییر فاصله در جهت شعاعی است.

با فرض هدف متحرک داریم:

$$\frac{dr_i}{dt} = \frac{dr_i}{dx} \times \frac{dx}{dt} \quad (۳)$$

با فرض اینکه بردار سرعت هدف متحرک موازی با محور Xها است رابطه زیر رادایم:

$$v = v_1 = \frac{dx_1}{dt} = v_2 = \frac{dx_2}{dt} \quad (۴)$$

با جاگذاری (۳) در (۲) و با توجه به نتیجه (۴)، رابطه اصلی FDOA به‌صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\tau^{\circ} = \frac{f_0 v}{c}\left(\frac{(x_T - x_2)}{\sqrt{((x_T - x_2))^2 + y^2{}_T}} - \frac{(x_T + x_1)}{\sqrt{((x_T + x_1))^2 + y^2{}_T}}\right) \quad (۵)$$

همان‌طور که از رابطه به‌دست‌آمده مشخص است، منحنی‌های FDOA توابع پیچیده مرتبه دوم هستند که با استفاده از روش‌های متعددی که در مراجع مختلف وجود دارد سعی در به دست آوردن روشی بهینه با دقت بالا دارند.

درروش اختلاف فرکانس داپلر باید فرستنده و یا سایت‌های گیرنده متحرک باشند. در اینجا حالت فرستنده متحرک را در نظر می‌گیریم. چیدمان مسئله در شکل (۱) نشان داده‌شده است. معادلات سه‌بعدی عمومی مورداستفاده در TDOA به‌صورت زیر است:

$$c\Delta t_{ij} = ct_i - \left[(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + (z - z_j)^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad (۶)$$

که در آن c، سرعت انتشار سیگنال و t_i زمان انتشار سیگنال از منبع به سمت گیرنده iام و x, y, z مختصات هدف است. غیرخطی بودن رابطه فوق باعث پیچیدگی روش حل و تخمین مکان فرستنده یا همان هدف است. یکی از ملاحظات عملی پیاده‌سازی سیس دستگاه‌ها این روش، سنکرون‌سازی دقیق فرستنده و گیرنده‌ها است تا زمان رسیدن سیگنال دقیق و بدون خطا باشد.

۴. روش پیشنهادی

۴-۱. محاسبه فرم بسته

موضوع موردبحث این قسمت، یافتن مکان و سرعت یک هدف متحرک است که در ابتدا بعد ارتفاع آن را برای سادگی در نظر نمی‌گیریم. یکی از روش‌های رایج در مکان‌یابی هدف ساکن، اندازه‌گیری TDOA سیگنال‌های دریافتی یک هدف ساکن در گیرنده‌های متفاوت است. هر TDOA یک هذلولی تعریف می‌کند که هدف روی آن قرار دارد و از برخورد آن‌ها، تخمین مکان هدف به دست می‌آید. وقتی هدف متحرک باشد باید FDOA نیز اندازه‌گیری گردد تا موقعیت مکانی و سرعت هدف اندازه‌گیری گردد.

۴-۲. خصوصیات روش پیشنهادی

- نیازی به فرض اولیه از موقعیت و سرعت هدف ندارد؛
- تنها شامل روش تخمین WLS[1] است؛
- وقتی نویز TDOA,FDOA گوسی بوده و سطح آن پایین باشد سطح CRLB[2] تأمین می‌گردد؛
- به ازای سطح نویز بالا، اثر آستانه‌ای رخ می‌دهد که ناشی از غیرخطی بودن مسئله است و بنابراین دقت تخمین از CRLB منحرف می‌گردد.

طبق تعاریف ذکرشده فاصله هدف تا گیرنده iام به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$r_i^{\circ} = \|u - s_i\| = \sqrt{(u - s_i)^T (u - s_i)} \quad (۷)$$

درنتیجه اختلاف فاصله سیگنال دریافتی در زوج گیرنده iام و یکم عبارت است از:

$$r_{i1}^{\circ} = r_i^{\circ} - r_1^{\circ} \quad (۸)$$

و بدین ترتیب نرخ فاصله برابر است با:

$$r^{\circ}{}_i = \frac{(\dot{u} - \dot{s}_i)^T (u - s_i)}{r_i^{\circ}} \quad (۹)$$

و اختلاف نرخ فاصله سیگنال دریافتی در زوج گیرنده iام و یکم عبارت است از:

$$\dot{r}_{i1}^{\circ} = \dot{r}_i^{\circ} - \dot{r}_1^{\circ} \quad (۱۰)$$

باکمی تغییر در رابطه (۱۰) به رابطه زیر می‌رسیم:

$$\left(r_{i1}^{\circ} + r_1^{\circ}\right)^2 = \left(r_i^{\circ}\right)^2 \quad (۱۱)$$

با جاگذاری (۱۰) در رابطه بالا و ساده‌سازی معادله حاصل‌شده رابطه زیر به دست می‌آید:

$$r^{\circ}{}_i{}^2 + 2r_{i1}^{\circ} r_1^{\circ} = s_i{}^T s_i - s_1{}^T s_1 - 2(s_i - s_1)^T u \quad (۱۲)$$

که دارای ویژگی‌های زیر است:

۱- این معادله نسبت به u غیرخطی است چون مطابق رابطه (۹) r_1° به u مربوط است.

۲- از تلاقی $M-1$ منحنی، تخمین موقعیت هدف به دست می‌آید.

1. Weighted Least Square
2. Cramer Raw Lower Band

۳- معادلات TDOA فقط تخمین مکان هدف را معلوم می‌کنند نه سرعت هدف .

۴- معادلات TDOAنمی‌توانند به‌تنهایی دقت لازم را برای تخمین مکان هدف فراهم کنند.

با اندازه‌گیری‌های FDOA ناشی از حرکت نسبی بین هدف و گیرنده، می‌توان هم‌زمان دقت تخمین را بهبود بخشید و سرعت هدف را محاسبه نمود. برای استفاده از FDOA کافی است از رابطه فوق مشتق گرفته شود که با اندکی ساده‌سازی به رابطه زیر می‌رسد:

$$\begin{aligned} 2\left(\dot{r}^{\circ}_{i1} r_{i1}{}^{\circ} + \dot{r}^{\circ}_{i1} r_1{}^{\circ} + r^{\circ}_{i1} \dot{r}_1{}^{\circ}\right) &= 2\left(\dot{s}_i{}^T s_i - \dot{s}_1{}^T s_1\right. \\ &\left. - (\dot{s}_i - \dot{s}_1)^T u - (s_i - s_1)^T \dot{u}^T\right) \end{aligned} \quad (۱۳)$$

درواقع مجموعه معادلات بالا، معادلات غیرخطی است که اندازه‌گیری‌های TDOA, FDOA را با سرعت و مکان هدف مرتبط می‌سازد.

۴-۳. روش تابع ابهام متقابل و مدل‌سازی سیگنال‌ها

با توجه به موارد مطرح‌شده برای به دست آوردن موقعیت هدف، نیاز به حل معادلاتTDOA, FDOA و هم‌چنین یافتن محل تقاطع معادلات است که در ابتدا تابع ابهام به‌صورت زیر مدل می‌شود:

$$A(\tau, f) = \int_0^T \alpha(t)\beta^*(t+\tau)\exp(-j2\pi f t)\, dt \quad (۱۴)$$

که α و β سیگنال‌های دریافتی از دو مسیر مختلف (سیگنال‌های باز ارسالی از ماهواره‌ها در مسیر و زمان مختلف) و τ, f نیز همان مقدار اندازه‌گیری شدهTDOA, FDOA است. T نیز بازه زمانی مشاهدات طی زمان انتگرال‌گیری است.

حال به‌منظور واردکردن اطلاعات بیشتر در حل مسئله، سیگنال‌ها به‌صورت زیر مدل‌سازی می‌شود:

$$\begin{aligned} \alpha(t) &= a\exp(j2\pi f_1 t) + w_1(t)\beta(t) \\ &= b\ exp\ (j2\pi f_2(t+D)) \\ &+ w_2(t) \end{aligned} \quad (۱۵)$$

$w_2(t)$و $w_1(t)$ نویزهای سفید گوسی جمع شونده، a و b دامنه‌های مختلط دلخواه سیگنال‌ها، D تأخیر زمانی رسیدن سیگنال و f_1 ، f_2سیگنال‌های دریافتی هستند.

در این مقاله علاوه بر مدل‌سازی سیگنال‌ها و در نظر گرفتن پارامترهای مختلف برای حل دقیق تابع ابهام، از روش تبدیل فوریه گسسته $\frac{N}{2}$ نقطه‌ای استفاده می‌شود که دارای دو مزیت اساسی نسبت به روش‌های مرسوم است. او لا دقت تخمین مجهولات بالاتر بوده که نتایج شبیه‌سازی نیز این قضیه را به‌خوبی نشان می‌دهد و ثانیاً در بازه زمانی مشاهدات سیگنال به دو قسمت تقسیم‌شده و از بار محاسبات و پیچیدگی مسئله کاسته می‌شود.

طیف سیگنال گسسته با تبدیل فوریه $\frac{N}{2}$نقطه‌ای به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \alpha(k) &= a_k \exp(j\varphi_k) \\ \beta(k) &= X(k)\exp(j\pi f_0 T) \end{aligned} \quad (۱۶)$$

که در آن:

$$k = 0,1,\ldots\frac{N}{2} - 1$$

و a_k, φ_k دامنه و فاز سیگنال هستند که پس از محاسبات به‌صورت زیر خواهد بود[۱۴].

$$\begin{aligned} a_k &= ab\frac{\sin\left[\pi\left(k - f_0\frac{T}{2}\right)\right]}{\sin\left[\frac{2\pi\left(k - f_0\frac{T}{2}\right)}{N}\right]} \\ \varphi_k &= (\varphi_1 - \varphi_2) + \left(1 - \frac{2}{N}\right)\left(f_0\frac{T}{2} - k\right)\pi \end{aligned} \quad (۱۷)$$

با جاگذاری (۱۶) در (۱۴) و مشتق گرفتن نسبت به پارامترهای τ, f مقادیرTDOA, FDOA به دست می‌آید که پس از محاسبات و ساده‌سازی روابط، رابطه زیر استخراج می‌گردد:

$$\widehat{f} = f_0\frac{T}{2}\,\Delta f + \frac{\Delta\varphi}{\pi T} \quad (۱۸)$$

که همان شیفت داپلر است و با جایگذاری رابطه فوق و تکرار یک مرحله دیگر از تبدیل فوریه، اختلاف‌زمانی رسیدن سیگنال‌ها به دست خواهد آمد.

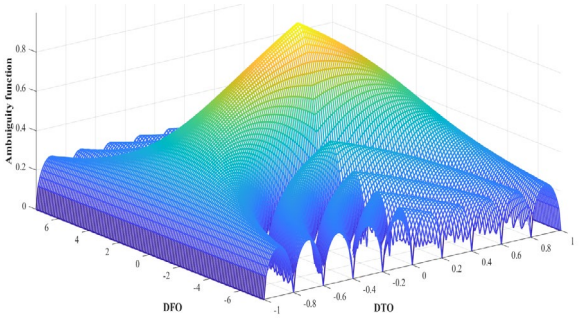
بنابراین با توجه به توضیحات فوق، برای حل مسئله مکان‌یابی با سناریوی در نظر گرفته‌شده، برخلاف روش‌های موجود (نیوتن، تخمین درستنمایی بیشینه و...) از روش تابع ابهام متقابل استفاده‌شده که برای حصول دقت بیشتر، سیگنال‌ها و نویزها با فرض‌های مشخص و پارامترهایی مدل‌سازی شدند و روش حل تابع ابهام نیز به‌جای حل انتگرال و اعمال روش‌های همبستگی، با استفاده از روش تبدیل فوریه گسسته با تعداد نقاط مشخص، حل گردید. در ادامه برای صحت سنجی مسائل تئوری و محاسبات انجام‌شده،نتایج شبیه‌سازی‌ها ارائه می‌گردد.

۵- شبیه‌سازی روش پیشنهادی

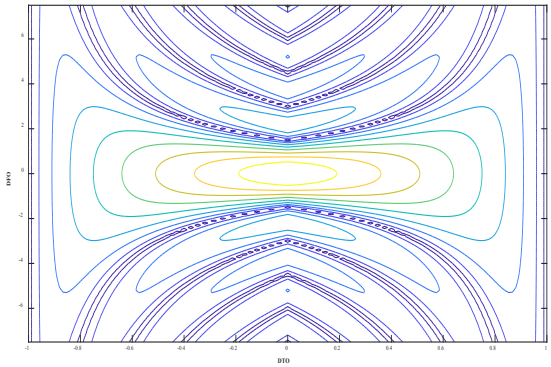
در این بخش قصد داریم عملکرد تخمین گر پیشنهادی را از طریق شبیه‌سازی‌های عددی ارزیابی کرده و با روش‌های موجود مقایسه کنیم برای این کار یک سیستم موقعیت‌یاب با N = ۴ فرستنده و M = ۵ گیرنده در نظر می‌گیریم. اندازه‌گیری‌های فاصله به‌صورت جمع‌کردن مقادیر صحیح اندازه‌گیری‌ها با نویز گوسی با میانگین صفر تولید می‌شوند لازم به ذکر است که الگوریتم پیشنهادی برای مدل نویز گوسی با ماتریس کواریانس دلخواه استخراج‌شده است؛ ولی، در شبیه‌سازی‌های این بخش به‌منظور سادگی ،تحلیل حالت خاص Q در نظر گرفته‌شده است عملکرد موقعیت‌یابی با معیارهای

کرامر رائو ارزیابی می‌شوند این معیارها از طریق شبیه‌سازی مونت‌کارلو محاسبه می‌شوند. تعداد شبیه‌سازی‌های مونت‌کارلو برابر ۵۰۰۰ است. موقعیت صحیح هدف در هر اجرا به‌صورت تصادفی با توزیع یکنواخت در فضای تحت پوشش انتخاب می‌شود. لازم به ذکر است که این روش‌ها عملکرد بهتری نسبت به سایر کارهای ارائه‌شده در ادبیات مکان‌یابی دارند.

در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، از مقادیر عملی برای هر پارامتر در سناریو استفاده می‌کنیم. ابتدا دو ماهواره زمین‌ایستا که دارای ناحیه پوشش مشترک هستند را انتخاب می‌کنیم. سرعت اولیه هدف ۱ کیلومتر بر ثانیه و فاصله این ماهواره‌ها از سطح زمین ۳۶۰۰۰ کیلومتر است. برای تشخیص و تفکیک بهتر در پردازش همبستگی، SNR ماهواره زمین‌ایستای اولیه را بیش از ۶ دسی‌بل فرض می‌کنیم (در این شبیه‌سازی برای SNR ثابت، ۱۰ دسی‌بل در نظر گرفته می‌شود)، و ماهواره مجاور تقریباً منفی ۴۰ دسی‌بل است. شکل (۳) نشان می‌دهد که با استفاده از روش CAF، تخمین مشترک TDOA/FDOA در نقطه پیک تابع واقع می‌شود.مقدار تیزی (sharpness) پیک همبستگی نشان‌دهنده دقت روش حل است که احتمال دقت مکان‌یابی را برای هر سطح از SNR موردنیاز نشان می‌دهد. برای بررسی بیشتر کانتور شکل(۳) نیز ترسیم‌شده است که در شکل(۴) نمایش داده‌شده است.

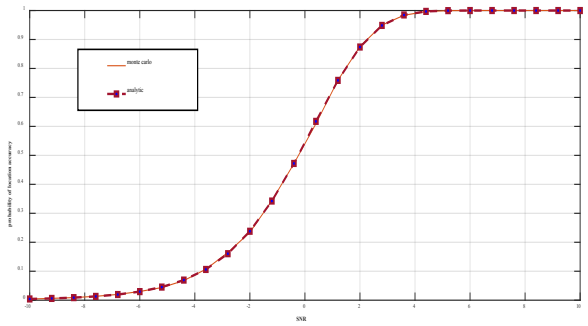


شکل ۳- تابع ابهام متقابل سیگنال‌های دریافتی



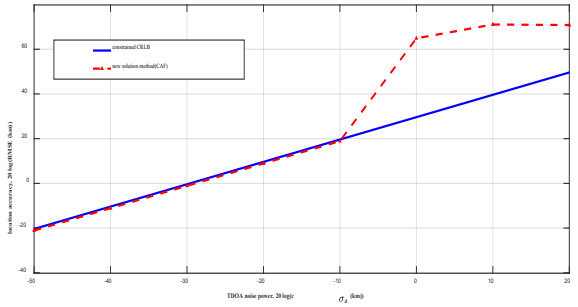
شکل ۴- کانتور تابع ابهام سیگنال‌های دریافتی

واضح است که نتیجه تحلیلی کاملاً با نتیجه مونت‌کارلو مطابقت دارد. همان‌طور که در نتایج شبیه‌سازی نشان داده‌شده است، در یک فرکانس و زمان خاص می‌توان پارامترها را تخمین زد و سپس مکان هدف را به دست آورد. برای بررسی دقت تخمین پارامترهای TDOA/FDOA، تحت شرایط شبیه‌سازی یکسان، با تولید SNR تصادفی سیگنال دریافتی، شبیه‌سازی‌های مونت‌کارلو را ۱۰۰۰ برابر می‌کنیم. شکل (۵) نشان می‌دهد، احتمال دقت مکان‌یابی با افزایش SNR بهبودیافته است.



شکل ۵- مقایسه عملکرد دو روش مونت‌کارلو و تحلیلی با تغییرات SNR

در نهایت نیز عملکرد روش پیشنهادی با معیار بهینه باند کرامر رائو بررسی گردیده که نتیجه آن به‌صورت شکل (۶) خواهد بود. همان‌طور که در شکل مشخص است در بازه مشخص‌شده از توان نویز، روش پیشنهادی کاملاً بر سطح کرامر رائو منطبق بوده و این نشان‌دهنده کارایی الگوریتم است.



شکل ۶- مقایسه عملکرد دو روش مونت‌کارلو و تحلیلی با تغییرات نویز

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی مبتنی بر پردازش همبستگی برای تخمین مشترک پارامترهای TDOA/FDOA در سیستم موقعیت‌یابی دو ماهواره‌ای ارائه شد. با مدل‌سازی دقیق سیگنال‌ها و اعمال فرضیات مختلف، پارامترهای مرتبط وارد فرآیند تخمین شدند. هدف این روش، بهبود دقت مکان‌یابی بود که با استفاده از روش CAF محقق شد. الگوریتم CAF طراحی و تحلیل شد و نتایج شبیه‌سازی نشان داد که این روش توانسته است به حد کرامر-رائو (CRLB) نزدیک شود. در شرایط SNR برابر با dB۶، دقت مکان‌یابی با خطای کمتر به دست آمد. همچنین این پژوهش روشی نوآورانه برای مکان‌یابی غیرفعال پهپادها با دو ماهواره GEO ارائه داد. طراحی سناریوی منحصربه‌فرد برای اهداف هوایی

متخاصم، دقت و پایداری را بهبود بخشید. استفاده از CAF و DFT پیچیدگی محاسبات را کاهش داد و به CRLB نزدیک شد. کاهش تعداد گیرنده‌ها به دو گیرنده و یک مرجع، کاربرد عملی را در شرایط واقعی تقویت کرد. برای ارزیابی عملکرد، روش پیشنهادی با دو روش دیگر از مقالات مرجع [۱۲] و [۱۳] مقایسه شد. در مقایسه با روش [۱۲]، که در آن در هر تکرار، تخمین اولیه در نظر گرفته‌شده، دقت مکان‌یابی به‌اندازه dB۳ بهبود و پیچیدگی محاسباتی نیز به دلیل استفاده از روش پیشنهادی کاهش یافت. البته درروش [۱۲] با بالابردن تعداد تکرار مرحله تخمین از دو مرحله به‌دفعات بالاتر، پایداری روش حل را در برابر نویزهای بالا افزایش می‌دهد ولیکن در هر مرحله محاسبات بسیار پیچیده‌تر می‌شود. در مقایسه با روش [۱۳]، پایداری عملکرد در شرایط SNRپایین بهبود قابل‌توجهی نشان داد. درروش ارائه‌شده در [۱۳] با واردکردن اطلاعات جانبی از شرایط مسئله ازجمله زاویه ورود سیگنال و حل مسئله در دستگاه مختصات WGS-84 و مدل‌سازی سناریو بر اساس آن، دقت مکان‌یابی را در SNR های پایین بهبود داده است اما، برای رسیدن به این دقت درروش تخمین، وزن دهی مراحل الگوریتم تخمین به‌صورت رندم در بازه ۰/۴ تا ۰/۹ در نظر گرفته‌شده و همچنین تعداد دفعات مونت‌کارلو تنها ۵۰ بار فرض گردیده است که خود سبب کاهش دقت روش صحت‌سنجی بر اساس شبیه‌سازی است. درنتیجه با مقایسه پژوهش‌های پیشین نتایج شبیه‌سازی‌های عددی با تحلیل‌های تئوری مطابقت کامل داشته و برتری روش پیشنهادی را در دقت مکان‌یابی، پایداری در شرایط نویز بالا و کاهش پیچیدگی محاسباتی تأیید می‌کند. این روش می‌تواند در دستگاه‌های عملی مکان‌یابی با استفاده از ماهواره‌ها، به‌ویژه در سناریوهای با چالش بالا، به کار گرفته شود.

۷. مرجع‌ها

[1] Guo, F.; Fan, Y.; Zhou, Y. “Space Electronic Reconaissance, Localization Theories and Methods”; John Wiley & Sons, 1st,2014. ISBN: 9781118542217.

[2] Jia, T.; Ho, K. C.; Wang, H.; Shen, X. “Effect of Motion on Time Delay and Doppler Shift Localization: Analysis and Solution”; IEEE Trans. Signal Process., 2019, 67, 5881–5895. doi: 1109/TSP.2019.2946025

[4] Zheng-bo, S.; Shang-fu,Y. “Analysis on Parameter Error of Satellite Interference Location”; APRASC, 2004, 265-268. doi: 1109/.2004.1422454

[5] Yan, H.; Cao, J.; Chen, L. “Study on Location Accuracy of Dual Satellite Geolocation System”; IEEE, ICSOP, 2010, 107-110. doi: 1109/ICOSP.2010.5656806

[6] Chestnut, P. “Emitter Location Accuracy Using TDOA and Differential Doppler”; IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., 1982, 2, 214-218 . doi: 1109/TAES.1982.309230

[7] Hao, C.; Liu, H.; Hao, K.; Wan, Q. “Satellite Interference Direct Geolocation Using Long-Time Coherent Integration”; IEEE ICCCI, 2019, doi: 1109/ICCC47050.2019. 9064270

[8] Ho, K.C; Xu, W. “An Accurate Algebraic Solution for Moving Source Location Using TDOA and FDOA Measurements”; IEEE Trans. Signal Process., 2004, 9, 2453–2463, doi: 1109/TSP.2004.831921

[9] Peters, Christopher; Thornton, “Cooperative UAS Geolocation of Emitters with Multi-Sensor-Bounded Timing and Localization Error”; IEEE Aerospace Conference, 2023, 1095323, doi: 10.1109/AERO55745.2023.10116023.

[10] Ankit, J.; Pagani, P.; Fleury, R. M.; Ney, M.; Pajusco, P. “Measurement Qualification Metrics for Passive HF Geolocation”; IEEE EuCAP, 2019, 978-88-907018-8-7. doi: 10.1109/EuCAP.2019.8740591

[11] Zou, Y.; Wan, Q. “Emitter Source Localization Using Time-of-Arrival Measurements from Single Moving Receiver”; IEEE Int. Conf. Acoust. Speech. Signal Process, 2017, 3444-3448. doi: 1109/ICASSP.2017.7952796

[12] Wu, R.; Zhang, Y. “A Novel Long-Time Accumulation Method for Double-Satellite TDOA/FDOA Interference Localization”; Radio Science AGU Publications, 2018, 53, 129-142. doi: 10/1002/2017RS006389

[13] Zou, Y.; Liu, H.; Wan, Q. “An Iterative Method for Moving Target Localization Using TDOA and FDOA Measurements”; IEEE Access, 2017, 2169-3536. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2785182.

[14] B, Yang; Lei, W.; Qun ,C.; Nan, L. “Passive Satellite Localization using TDOA/FDOA/AOA Measurements”, IEEE Conference Anthology, 978-1-4799-1660-3, 2014. doi: 10.1109/ANTHOLOGY.2013.6784815.

[15] Jung, H.; Kang, J.; Kim, S. “EKF-based Geolocation using TDOA/FDOA Measurements in Dual-Satellite”; IEEE 13th International Conference on Information and Communication Technology Convergence, 2022. doi: 1109/ICTC55196. 2022.9952551.

[16] Geeraret, J. L.; Mahon, J. W. “Dual- satellite Geolocation with Ephemeries Correction and Uncertainty Mapping”; IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., 2020. doi: 1109/TAES.2019. 2920045.