

ارزیابی میدانی راهکار پیشنهادی برای تعیین فاکتور ثانویه اضافی در سامانه ناوبری برد بلند

سید محمد مهدی دهقان^۱، علی پارسا^۲، احیاء باوری^۳، مهدی خادمیان^۴

^۱ استادیار مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، Smmmd@mut.ac.ir

^۲ دکترای مهندسی برق-کنترل، فارغ التحصیل کارشناسی و کارشناسی ارشد دانشکده فنی دانشگاه تهران

^۳ کارشناسی ارشد مهندسی برق-الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

^۴ دکترای مهندسی برق- دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

هدف از این مقاله امکان‌سنجی و ارائه راهکاری مناسب جهت محاسبه یا اندازه‌گیری فاکتور ثانویه اضافی (ASF) به منظور افزایش دقت سامانه لورن، از انواع سامانه‌های ناوبری زمین‌پایه است. فاکتور ثانویه اضافی به دلیل تغییر سرعت امواج الکترومغناطیسی به هنگام عبور از محیط‌هایی با توپولوژی و رسانایی متفاوت ایجاد می‌شود. در این مقاله ابتدا به بررسی عوامل ایجادکننده و تاثیرگذار بر روی فاکتور ثانویه اضافی پرداخته می‌شود. سپس، روش‌های محاسبه یا اندازه‌گیری آن مطرح شده و راهکار مناسب برای تعیین آن پیشنهاد می‌گردد. در ادامه، الگوریتمی جهت محاسبه و اندازه‌گیری آن در کشور پیشنهاد شده و با توجه به امکانات فعلی کشور که هنوز سامانه لورن در آن فعال نگردیده، راهکاری جهت تحلیل و تعیین ASF با استفاده از سامانه‌های لورن فعال در کشورهای همسایه ارائه می‌گردد. همچنین روشی برای اعتبارسنجی و تحلیل روش پیشنهادی ارائه شده و به صورت میدانی مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج آن مورد تحلیل قرار می‌گیرند. در پایان نیز با توجه به نتایج بدست آمده راهکاری برای ادامه فعالیت بر روی محاسبه و اندازه‌گیری ASF به منظور استفاده در سامانه‌های لورن ملی ارائه می‌شود.

کلیدواژه

ناوبری برد بلند، سامانه‌های لورن ملی، فاکتور ثانویه اضافی، سناریوی اعتبارسنجی، تست میدانی.

مقدمه

متعددی به بررسی ابعاد مختلف سامانه لورن-سی از جمله کاربردهای متنوع این سامانه، تحلیل سیگنال دریافتی، ملاحظات پیاده‌سازی، منابع خطا و سایر موضوعات مرتبط پرداخته‌اند [۱-۸]. سامانه‌های لورن برای مکان‌یابی یک هدف از اختلاف زمانی پالس‌های رسیده از فرستنده‌های اصلی و پیرو که در یک شبکه چندگره‌ای قرار می‌گیرند، استفاده می‌کنند [۹]. بنابراین دقت اندازه‌گیری زمان و دقت تعیین سرعت حرکت امواج رادیویی بر روی سطح زمین تاثیر فراوانی بر دقت ناوبری در این سامانه دارد.

برای محاسبه مدت زمان گذر سیگنال لورن از یک مسافت مشخص، به عنوان یک تقریب اولیه فرض می‌کنند که سیگنال با سرعت نور در فضای آزاد حرکت می‌کند. مدت زمان محاسبه شده برای گذر از یک مسافت مشخص بر اساس سرعت نور در فضای آزاد، فاکتور فاز اولیه^۴ (PF) نامیده می‌شود. سپس، تاخیر

استفاده از یک سامانه ناوبری زمین‌پایه مانند لورن به عنوان پشتیبانی مطمئن برای GPS برای کشورهای مختلف بخصوص ایران از اهمیت زیادی برخوردار است. واژه‌های لورن^۱ مخفف انگلیسی ناوبری با برد زیاد^۲ است. سامانه لورن، یک سامانه ناوبری رادیویی زمین‌پایه بوده که بر اساس تفاوت زمانی دریافت سیگنال تولید شده از سه فرستنده جداگانه کار می‌کند. در این سامانه، فرستنده‌ها بر روی سطح زمین بوده و گیرنده‌ها در سامانه‌های دریانوردی، هوانوردی و زمینی قرار دارند. سامانه لورن-سی^۳ یک سامانه ناوبری رادیویی زمین‌پایه در طیف فرکانس رادیویی ۹۰ تا ۱۱۰ کیلوهرتز است. مقالات

^۱ Loran

^۲ LORAN RANGE NAVIGATION

^۳ LORAN-C

^۴ Primary Factor

داده دقیق و جزئی از هدایت الکتریکی و توپولوژی زمین دارد [۲۴].

پیش از این پژوهش، پروژه تحقیقاتی-کاربردی در زمینه جبرانسازی خطای ناشی از تغییرات زمان دریافت سیگنال به دلیل تغییرات عوارض سطح زمین که نتایج عملی در بر داشته باشد، در کشور انجام نشده است. تنها در پژوهش [۲۵] به روشی برای محاسبه ASF اشاره شده است ولی چگونگی عملی کردن این روش و ملاحظات کاربردی آن مورد بررسی قرار نگرفته است.

هدف از این مقاله امکان‌سنجی و ارائه‌ی راهکاری مناسب جهت محاسبه یا اندازه‌گیری فاکتور ثانویه اضافی (ASF) جهت افزایش دقت سامانه لورن است. همچنین ارائه‌ی الگوریتمی جهت اندازه‌گیری آن در کل سطح کشور مورد نظر است. در این مقاله ابتدا، روش‌های میدانی اندازه‌گیری ASF مطرح شده، سپس الگوریتم و راهکاری مناسب برای تعیین آن پیشنهاد شده است که مزایای روش‌های دیگر را داشته و تا حد ممکن معایب کم‌تری نسبت به آنها داشته باشد. سپس با توجه به امکانات فعلی کشور که هنوز سامانه ناوبری برد بلند آن فعال نگردیده است، راهکاری جهت تحلیل و تعیین عملیاتی ASF با استفاده از سامانه‌های لورن فعال در کشورهای همسایه ارائه شده است. همچنین روشی برای اعتبارسنجی و تحلیل روش پیشنهادی ارائه شده است. این روش، به صورت میدانی مورد آزمایش قرار گرفته و داده‌های آن تحلیل شده‌اند. این مقاله سعی در ارائه دستاوردهای حاصل از اولین تلاش‌های میدانی برای محاسبه مقادیر جبران‌سازی ASF دارد. استخراج یک نقشه جبران‌سازی ASF برای کاربردی شدن سامانه ناوبری زمین‌پایه ملی ضروری بوده و این مقاله ابتدای این مسیر را ترسیم نموده است.

روش‌های میدانی محاسبه ASF

برای دست‌یافتن به دقت بالا در بازه ۸ تا ۲۰ متر (۹۵ درصد)، مقادیر خیلی دقیق ASF مورد نیاز است [۱۲]. این دقت بالا فقط با اندازه‌گیری‌های مستقیم قابل دست‌یابی است [۱۲]. در روش میدانی اندازه‌گیری ASF زمان عبور سیگنال‌ها را در یک نقطه اندازه‌گیری می‌نمایند. سپس با فرض آن که کل مسیر انتشار سیگنال دریا باشد، زمان عبور سیگنال‌ها را در همان نقطه از طریق مدل ریاضیاتی محاسبه نموده و اختلاف مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر محاسبه شده را مشخص می‌کنند. برای اندازه‌گیری ASF برای یک نقطه از سطح کشور، اندازه‌گیری و محاسبه‌ی دقیق زمان و موقعیت اهمیت دارد. موقعیت (فاصله‌ی گیرنده از فرستنده) از الگوریتم Vincenty

عبور سیگنال از روی دریا نسبت به فضای آزاد که فاکتور فاز ثانویه^۵ (SF) نامیده می‌شود، محاسبه می‌شود. در پایان نیز به محاسبه‌ی میزان تاخیر ناشی از عبور از سطوح ترکیبی خشکی و دریا در مقایسه با سطح دریا که فاکتور ثانویه اضافی^۶ (ASF) نامیده می‌شود، پرداخته می‌شود [۱۰]. برای تأمین دقت مورد نیاز، بایستی مدت زمان اندازه‌گیری شده توسط گیرنده‌های لورن از جمله به دلیل فاکتور ثانویه اضافی کالیبره و جبران‌سازی گردد.

برای محاسبه مقادیر اصلاح ASF دو روش کلی وجود دارد. روش اول، اندازه‌گیری ASF در برخی نقاط به صورت میدانی و درون‌یابی در سایر نقاط است [۱۱-۱۵]. روش دوم، استفاده از روش‌های تئوری برای محاسبه‌ی ASF است [۱۰]. اگر چه هزینه‌ی روش اول بیشتر است، اما با توجه به دقت آن در نقاط اندازه‌گیری‌شده ASF، می‌توان در نقاط خاصی مانند فرودگاه‌ها و بندرگاه‌ها از آن استفاده کرد [۱۵]. در روش دوم از دو تئوری قدیمی الگوریتم میلینگتون [۱۰] و روش معادله انتگرالی [۱۶] برای محاسبه و تخمین ASF استفاده می‌شود که به طور کلی از دقت پایینی برخوردار است [۱۷]. در مقالات، روش‌های شبیه‌سازی عددی [۱۹-۲۲] نیز برای تخمین ASF ارائه شده است که به‌ندرت به کار گرفته می‌شوند.

مقادیر ASF ناشی از عوامل مختلفی است که در دو دسته مکانی و زمانی دسته‌بندی می‌شوند. به عبارت دیگر بخشی از اثر ASF وابسته به عوارض موجود در حد فاصل فرستنده و گیرنده است. برای مدل‌سازی این بخش و با فرض معلوم بودن موقعیت فرستنده‌های اصلی و فرعی برای دو نقطه از سطح منطقه، یک مقدار جبران‌سازی در نظر گرفته می‌شود که بخش ثابت ASF^۷ نامیده می‌شود. برای اندازه‌گیری صحیح مقدار جبران‌سازی ASF، مجموعه‌ای از مشاهدات برای یک موقعیت مفروض در طول زمان جمع‌آوری شده و از میان داده‌های تصادفی بدست آمده، میزان مناسب جبران‌سازی ASF تخمین زده می‌شود. میزان ASF محاسبه شده در زمان‌های مختلف برای یک موقعیت مشخص، به دلیل تغییراتی از قبیل تغییرات آب و هوایی که در طول زمان بوجود می‌آید، تغییرات اندکی دارد که بخش متغیر با زمان ASF^۸ نامیده می‌شود [۲۳].

برای محاسبه‌ی ASF با استفاده از نرم‌افزار، تلاش‌های متعددی صورت گرفته که نرم‌افزار بالور^۹ نمونه‌ای از آنها است [۲۴]. این نرم‌افزار براساس روش میلینگتون توسعه یافته است. مدل‌سازی به روش میلینگتون یا هر روش تئوری دیگری نیاز به یک پایگاه

^۵ Secondary Factor
^۶ Additional Secondary Factor
^۷ Spatial ASF
^۸ Temporal ASF
^۹ BALOR

محاسبه ASF برای مکان‌یابی براساس زمان دریافت سیگنال

در روش TOA زمان ارسال سیگنال هر زنجیره^{۱۲} (TOE) به طور دقیق نسبت به UTC معلوم می‌شود. بنابراین با تفاضل زمان دریافت سیگنال^{۱۳} (TOA) از زمان ارسال آن (TOE)، زمان واقعی انتقال سیگنال اندازه‌گیری می‌شود. سپس با تفاضل زمان واقعی انتقال سیگنال از زمان محاسبه شده‌ی انتقال سیگنال برای فاکتورهای اولیه و ثانویه، با ASF با استفاده از رابطه (۲) و (۳) بدست می‌آید [۱۴]:

$$TOF_m = TOA - TOE \quad (2)$$

$$ASF = TOF_m - TOF_e \quad (3)$$

در روابط بالا، TOF_e زمان مورد انتظار و TOF_m زمان اندازه‌گیری شده‌ی گذر سیگنال از فرستنده تا گیرنده است.

سناریو پیشنهادی برای تهیه نقشه‌ی مقادیر جبران‌سازی ASF در سراسر کشور

همانطور که گفته شد، روش میدانی منجر به نتایج دقیق‌تری نسبت به روش‌های محاسباتی می‌شود. اما، برای مناطق وسیع، اندازه‌گیری برای تمام نقاط یا حتی اندازه‌گیری برای نقاط مش‌بندی شده^{۱۴} با فواصل کم، هزینه‌ی زیادی دارد. لذا در صورتی که اطلاعات دقیقی از توپولوژی و هدایت الکتریکی زمین‌های واقع در مسیر عبور سیگنال وجود داشته باشد، می‌توان از روش‌های محاسباتی نیز استفاده کرد و با اندازه‌گیری‌های کمتر به نتایج مطلوب دست یافت.

روشی که در این مقاله جهت محاسبه و اندازه‌گیری ASF در یک منطقه‌ی وسیع پیشنهاد می‌شود آن است که ابتدا نقاط مهم و حساس مانند بنادر یا فرودگاه‌ها انتخاب و اندازه‌گیری ASF به روش میدانی در این نقاط انجام شود. سپس با توجه به اطلاعات و نقشه‌های هدایت الکتریکی زمین و توپوگرافی آن، مناطقی که در مجاورت هم دارای هدایت الکتریکی نزدیک به هم بوده و همچنین شکل توپوگرافی و پستی بلندی آن‌ها یکسان است (برای مثال در یک جلگه یا یک دریاچه) به عنوان مناطق با وضعیت مشابه انتخاب شوند. در این مناطق که انتظار می‌رود تغییرات شدیدی بر روی مقادیر ASF رخ ندهد، می‌توان با استفاده از مش‌بندی با فاصله‌ی زیاد، اندازه‌گیری میدانی ASF را برای تعداد کمی نقاط انجام داد و با درون‌یابی سایر

[۲۶] یا روش‌های جغرافیایی دیگر [۲۷] بدست می‌آید. همچنین در صورتی که GPS در دسترس باشد، می‌توان از آن در تعیین موقعیت گیرنده نسبت به فرستنده استفاده کرد. زمان مورد انتظار گذر سیگنال از فرستنده تا گیرنده^{۱۵} (TOF_e) با در نظر گرفتن فاکتورهای اولیه و ثانویه به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۴]:

$$TOF_e = \rho \frac{n_{PF}}{c} + SF(\rho) \quad (1)$$

در این رابطه ρ فاصله‌ی گیرنده از فرستنده، n_{PF} ضریب فضای عبور سیگنال نسبت به خلاء یا ضریب فاکتور اولیه، c سرعت عبور نور از خلاء و $SF(\rho)$ نیز مدت زمان عبور سیگنال از فرستنده تا گیرنده‌ی مورد نظر با فرض عبور سیگنال از روی دریا در سرتاسر مسیر می‌باشد.

سامانه لورن‌سی از اختلاف زمان دریافت سیگنال (TD)^{۱۱} برای مکان‌یابی استفاده می‌نماید ولی نسل‌های جدیدتر این سامانه که در برنامه‌های جدیدتر بیشتر مورد توجه هستند از زمان دریافت سیگنال برای مکان‌یابی استفاده می‌نمایند. بنابراین دو روش میدانی TD یا اختلاف زمانی و TOA یا زمان دریافت برای محاسبه ASF وجود دارد. در نظر گرفتن الزامات و محدودیت‌های محاسبه ASF در این دو روش در توسعه سامانه‌ی ملی ضروری است. در ادامه، این دو روش مورد بحث قرار می‌گیرند.

محاسبه ASF برای مکان‌یابی براساس اختلاف زمان دریافت

در روش TD، ASF هر نقطه نسبت به هر زوج ایستگاه فرستنده تعیین می‌گردد. به این صورت که مقدار زمان دریافت سیگنال از یکی از ایستگاه‌های فرستنده از مقدار زمان دریافت سیگنال نسبت به ایستگاه فرستنده‌ی دیگر کم می‌شود. سپس همین زمان برای حالتی که کل مسیر دریا باشد، محاسبه گردیده و اختلاف این دو مقدار، ASF آن نقطه را نسبت به آن زوج ایستگاه بدست می‌دهد. در این روش عوارض موجود در حد فاصل هر دو ایستگاه فرستنده تا نقطه‌ی موردنظر، در محاسبه‌ی ASF موثر است. بنابراین، برای نقاط مجاور ممکن است اختلاف‌های زیادی داشته باشد.

^{۱۲} Time of Emission
^{۱۳} Time of Arrival
^{۱۴} Gridding

^{۱۱} Expected Time of Flight
^{۱۵} Time Difference

سناریو تست و اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی برای محاسبه و اندازه‌گیری ASF یک نقطه

با توجه به این که سامانه‌ی لورن در کشور هنوز راه‌اندازی نشده است و الگوریتم گفته شده‌ی فوق به طور کامل قابل پیاده‌سازی و اجرا نیست، در ادامه سناریویی برای تست و محاسبه‌ی ASF پیشنهاد شده است. هدف از این سناریو، ارزیابی روش میدانی اندازه‌گیری ASF و استخراج چالش‌های پیش رو در این زمینه است.

سناریوی پیشنهادی تست

در شرایطی که سامانه ناوبری برد بلند ملی هنوز راه‌اندازی نشده است، برای تست و ارزیابی روش پیشنهادی باید از زنجیره‌های فعال در کشورهای همسایه که داده‌های آن‌ها درون مرزهای کشور قابل دریافت است، بهره گرفت. از میان زنجیره‌های قابل دریافت در شمال غرب و جنوب کشور، زنجیره‌ی لورن عربستان به کشور ایران نزدیک‌تر است و امکان دریافت ضعیف سیگنال‌های فرستنده‌ی آن در جنوب کشور ممکن است. باید در نظر داشت که با توجه به فاصله‌ی زیاد ایستگاه‌های اولیه (اصلی) و ثانویه، در برخی نقاط سیگنال فقط از یکی از فرستنده‌های این زنجیره قابل دریافت است. بنابراین، باید روش پیشنهادی برای تست و ارزیابی میدانی قابلیت اجرا را در شرایطی که فقط یک داده TOA دریافت می‌شود، داشته باشد. با توجه به روش اندازه‌گیری و محاسبه‌ی ASF، با داشتن داده‌های GPS و مشخص شدن محل دقیق تست و همچنین با داشتن زمان ارسال سیگنال ارسال شده، می‌توان زمان ارسال را از زمان پرواز محاسبه شده با فرض این که کل طول مسیر دریا باشد، کسر نمود و ASF را محاسبه کرد.

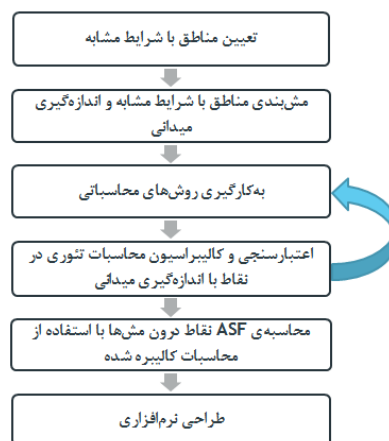
راهکار دیگری که برای محاسبه‌ی ASF در این سناریوی تست پیشنهاد می‌شود، استفاده از اندازه‌گیری‌های TD است. برای این محاسبه، باید در هر نقطه مورد تست، TD مورد انتظار و TD اندازه‌گیری شده را با هم مقایسه نمود و اختلاف آن‌ها را با استفاده از ASF جبران‌سازی کرد.

برای اعتبارسنجی محاسبه‌ی ASF از روش اول با استفاده از TOA، می‌توان این تست را در چند نقطه در راستای مستقیم سیگنال ارسال شده انجام داد. سپس بر اساس دانش جغرافیایی از توپولوژی و هدایت الکتریکی زمین در بین این چند نقطه، از روش محاسباتی، ASF در نقطه جدید را تخمین زده و این دو نتیجه را با یکدیگر مقایسه کرد. یکی از نقاط مناسب برای اندازه‌گیری در نزدیکی دریا است که مسیر فرستنده تا گیرنده

نقاط، ASF منطقه را تعیین نمود. در این مقاله روش دقیق‌تری پیشنهاد می‌شود که به جای استفاده از درون‌یابی در سایر نقاطی که ASF در آنها به صورت میدانی محاسبه نمی‌گردد، از روش محاسباتی کالیبره شده استفاده می‌کند. این روش ASF را در نقاطی که به روش میدانی اندازه‌گیری شده است، به کمک روش‌های محاسباتی مانند روش میلینگتون محاسبه نموده و سپس با مقایسه آن‌ها با نتایج اندازه‌گیری‌های میدانی، روش محاسباتی را کالیبره می‌کند. از این روش محاسباتی کالیبره شده می‌توان در مناطقی که هم از نظر موقعیت جغرافیایی نزدیک به هم بوده و هم از نظر توپوگرافی و هدایت الکتریکی زمین شبیه به هم هستند، در نقاطی که اندازه‌گیری میدانی ASF انجام نشده، استفاده کرد.

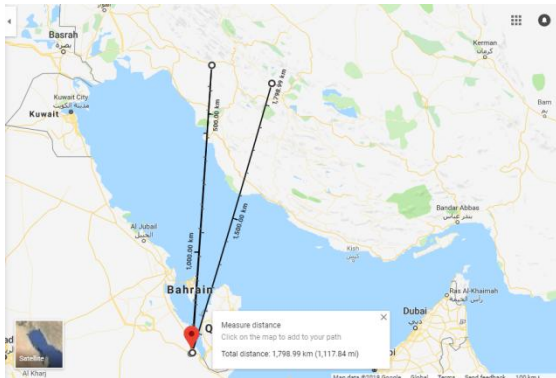
با توجه به توضیحات فوق، الگوریتم محاسبه و اندازه‌گیری ASF در سطح کشور به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

- ۱- تعیین مناطق با شرایط مشابه بر اساس داده‌های هدایت الکتریکی و توپوگرافی کشور
- ۲- مش‌بندی مناطق با شرایط مشابه و اندازه‌گیری میدانی ASF محل تقاطع خطوط
- ۳- بکارگیری روش‌های محاسباتی تعیین ASF به کمک داده‌های هدایت الکتریکی و توپوگرافی کشور و با در نظر گرفتن مسیر عبور سیگنال از فرستنده به گیرنده
- ۴- اعتبارسنجی محاسبات تئوری در نقاطی که اندازه‌گیری میدانی صورت گرفته است؛ سپس کالیبراسیون محاسبات با مقایسه‌ی نتایج محاسبات تئوری و اندازه‌گیری‌های میدانی در این نقاط
- ۵- محاسبه‌ی ASF نقاط درون مش‌ها با استفاده از محاسبات کالیبره شده
- ۶- طراحی نرم‌افزاری جهت محاسبه سریع و خودکار این مقادیر به روش گفته شده



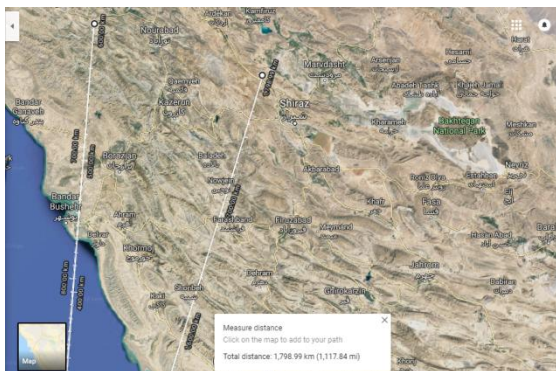
شکل ۱: الگوریتم پیشنهادی محاسبه و اندازه‌گیری ASF

عبور نمی‌کنند. راستاهای انتخابی در این محدوده با در نظر گرفتن شرایط و امکانات تست، می‌توانند مناسب باشند.



شکل ۲: نقشه خلیج فارس که در آن ایستگاه فرستنده‌ی سلوا و محدوده‌ی راستاهای انتخابی جهت تست میدانی مشخص شده است.

در شکل ۳ وضعیت جغرافیایی و پستی بلندی زمین در بین این دو راستا نشان داده شده است. در این مناطق پستی و بلندی‌هایی دیده می‌شود که برای بررسی تغییرات ASF بین نقاط تست و اعتبارسنجی اندازه‌گیری آن مناسب هستند.



شکل ۳: وضعیت جغرافیایی و پستی بلندی زمین در منطقه‌ی موردنظر تست

همچنین با بررسی نقشه‌ی هدایت الکتریکی زمین در این منطقه ملاحظه می‌شود که با دور شدن از ساحل و منطقه‌ی جلگه‌ای بندر بوشهر، هدایت الکتریکی زمین تغییر قابل توجهی می‌کند که برای دیدن این اثر در تغییرات ASF بین نقاط تست مناسب است. در شکل ۴ نقشه هدایت الکتریکی زمین در ایران ملاحظه می‌شود.

کاملاً مسیر آبی باشد و SF قابل اندازه‌گیری بوده و طبق انتظار ASF صفر بدست آید.

در این تست از دستگاه گیرنده‌ی سیگنال LORADD ساخت شرکت Reelektronika استفاده شده است [۲۸].

مکان‌های پیشنهادی برای جمع‌آوری داده

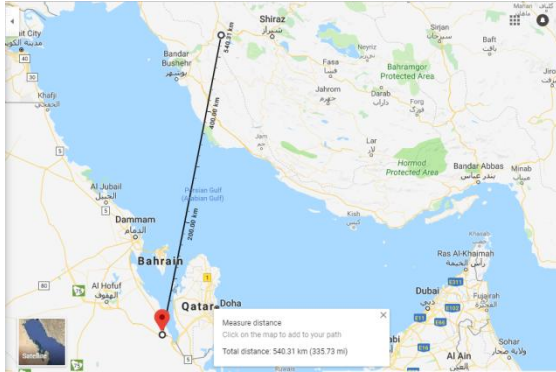
این تست به دنبال آن است که اثر عوارض و جنس سطح زمین را در کم شدن سرعت انتشار مطالعه نماید. پس باید نقطه مرجعی با ASF صفر در مجاورت دریا در نظر گرفته شده و سایر مکان‌ها در درون کشور نسبت به آن سنجیده شود. با معلوم بودن این مکان‌ها، تغییر زمان انتشار اندازه‌گیری شده نسبت به مقدار محاسبه شده ناشی از عوارض و جنس سطح زمین خواهد بود. بنابراین سایر مکان‌های انتخابی بایستی بر روی خط مستقیم حاصل از ایستگاه فرستنده و نقطه مرجع انتخاب گردند تا مسیر حد فاصل فرستنده تا نقطه مرجع یکسان شده و امکان مقایسه فراهم شود.

از سوی دیگر، برای محاسبه ASF در هر دو روش TD و TOA، انتخاب مکان‌های اندازه‌گیری باید مناسب باشد. محاسبه ASF در روش TD در نقاطی میسر است که داده‌های هر سه فرستنده زنجیره عربستان (یا حداقل دو فرستنده) قابل دریافت باشد. ضمناً در این روش امکان مقایسه ASF دو مکان متفاوت به دلیل یکسان نبودن مسیر حدفاصل فرستنده‌ها تا نقطه مرجع وجود ندارد.

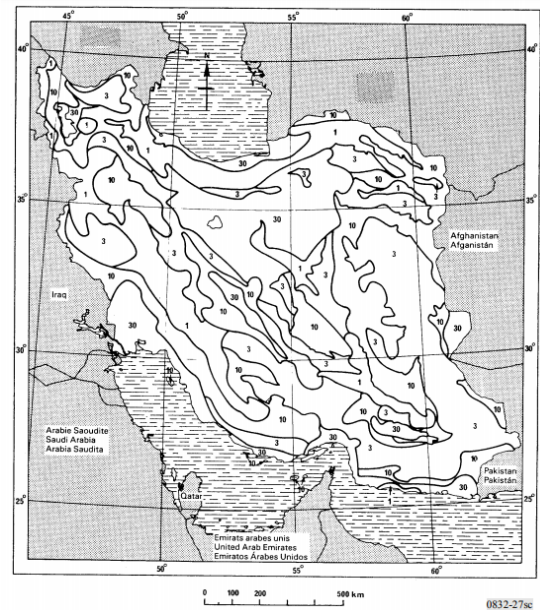
در روش TOA، نقطه مرجع مکانی در کنار مرز دریایی است که نزدیک‌ترین فاصله را با یکی از فرستنده‌ها داشته و هیچ جزیره‌ای نیز در این فاصله قرار نگرفته باشد (در این حالت با توجه به این که کل مسیر دریایی است، SF قابل اندازه‌گیری است). به عبارت دیگر، حتی‌الامکان مسیر کاملاً دریایی باشد. بنابراین، نقاطی که برای محاسبه ASF در روش TOA انتخاب می‌شوند برای روش TD نیز مناسب خواهند بود.

فرستنده‌ی پیشنهادی برای تست، ایستگاه فرستنده‌ی سلوا^{۱۵} از زنجیره‌ی عربستان در نزدیکی کشور قطر است. نزدیکی این ایستگاه به خلیج فارس، امکان انتخاب مسیر کاملاً دریایی از فرستنده تا گیرنده را ایجاد می‌نماید. طبق سناریوی پیشنهادی تست میدانی، باید نقاطی بر روی یک خط مستقیم در امتداد این ایستگاه یافت و با مقایسه نتایج این نقاط، به اطلاعاتی از ASF بین دو نقطه دست پیدا کرد. در شکل ۲ محل ایستگاه سلوا مشخص شده است. راستاهای مناسب در محدوده‌ی بین دو راستایی که در شکل ۲ مشخص شده‌اند، هستند. زیرا، مسیر کوتاه‌تری تا ایستگاه سلوا دارند و همچنین از جزیره بحرین

زنجیره‌ی عربستان جمع‌آوری شده است. در جدول ۱ اطلاعات مهم هر یک از مکان‌های جمع‌آوری اطلاعات، ارائه شده است. در ادامه نیز تحلیل‌ها و نتایج بدست آمده از تست‌ها بیان می‌گردند.



شکل ۵: راستای نقاط تست انتخابی



شکل ۴: نقشه‌ی هدایت الکتریکی زمین در ایران



شکل ۶: تصویری از تجهیزات و آنتن تست در منطقه‌ی کبگان

در شکل ۵ راستا و نقاط پیشنهادی برای تست نشان داده شده است. منطقه کبگان به دلیل نزدیکی به دریا به عنوان نقطه مرجع با ASF صفر در نظر گرفته شده است تا تقریباً کل مسیر سیگنال در دریا باشد. دو نقطه‌ی دیگر، در خورموج و کلمه انتخاب شده‌اند تا قدرت سیگنال به اندازه‌ی کافی باشد.

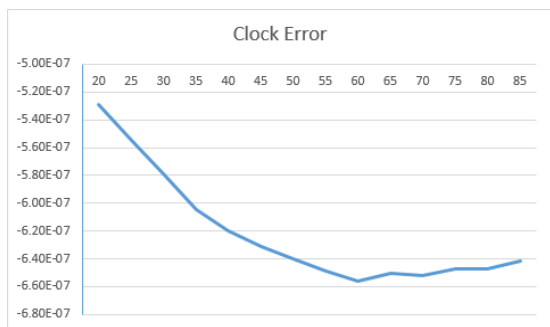
نتایج تست میدانی

در این بخش به بررسی و تحلیل داده‌های میدانی بدست آمده در استان بوشهر پرداخته می‌شود. طبق سناریوی پیشنهادی مطرح شده، در چند نقطه از استان بوشهر اطلاعات ایستگاه‌های

جدول ۱. نکات اصلی از محل نقاط جمع‌آوری داده و اطلاعات دریافتی

شماره تست	نام مکان	تاریخ و ساعت تست	مختصات GPS	وضعیت دریافت مدوله‌سازی 8830M (فرستنده اصلی)	وضعیت دریافت مدوله‌سازی 8830W (سلوا)	وضعیت دریافت مدوله‌سازی 8830Y (شیخ حَمید)	TD ایستگاه سلوا نسبت به فرستنده اصلی (us)
۱	اسکله جلالی	۵ دی ۱۰:۳۰	Lat: 28.92042896 Lon: 50.80613448	عدم دریافت با SNR=-3	دریافت با SNR=18.9	عدم دریافت	11904.20
۲	اسکله جلالی	۶ دی ۱:۱۵ بامداد	Lat: 28.92044738 Lon: 50.80615252	دریافت با SNR=-5.5	دریافت با SNR=14.5	عدم دریافت با SNR=-11.5	11904.15
۳	بربو	۵ دی ۱۲:۰۰	Lat: 28.64440833 Lon: 51.07638150	عدم دریافت با SNR=-6.5	دریافت با SNR=15.5	عدم دریافت با SNR=-27.5	11790.45
۴	کبگان	۵ دی ۱۶:۰۰	Lat: 28.24009951 Lon: 51.27869747	دریافت با SNR=12.5	دریافت با SNR=29.5	دریافت با SNR=-7	11669.45
۵	خورموج	۶ دی ۱۳:۰۰	Lat: 28.66541200 Lon: 51.36354450	عدم دریافت با SNR=-10	دریافت با SNR=15	عدم دریافت با SNR=-20	11728.00
۶	کلمه	۶ دی ۱۴:۴۵	Lat: 28.9089400 Lon: 51.4153727	دریافت با SNR=0	دریافت با SNR=15.5	عدم دریافت با SNR=-3	11759.35

نتایج و تحلیل‌ها



شکل ۸: نمودار خطای کلاک گیرنده در اثر تغییرات کریستال آن، اندازه‌گیری شده در منطقه کبگان

تحلیل ۳ - اثر عدم هم‌زمانی فرستنده و گیرنده با UTC در محاسبات TOA: نکته‌ی دیگری که در این تست مشاهده شد آن است که TOA بدست آمده در یک منطقه‌ی خاص، در هر بار تست مجدد در آن منطقه، دچار تغییرات (بایاس) زیاد می‌شود. علت این مشکل آن است که برای داشتن یک TOA درست و دقیق، نیاز به همان‌سازی گیرنده با دقت بالا با UTC است تا بتوان از روی زمان دقیق GRI زنجیره‌ی مورد تست نسبت به UTC، زمان دقیق ارسال سیگنال را محاسبه و در نتیجه زمان عبور سیگنال در مسیر و TOA را محاسبه کرد. با توجه به این که گیرنده‌ی مورد استفاده در این تست از UTC دقیق استفاده نمی‌کند، نتایج TOA مناسبی بدست نیامده است. اما، با توجه به این که برای محاسبه‌ی TD به هم‌زمانی نیاز نیست و سیگنال‌ها نسبت به هم مقایسه می‌گردند، TDهای بدست آمده در نقاطی که حداقل سیگنال دو ایستگاه از زنجیره‌ی عربستان دریافت شده است، درست و منطقی هستند. در این تست در منطقه‌ی کبگان، سیگنال‌های سه ایستگاه از زنجیره‌ی عربستان و در مناطق دیگر یک یا دو سیگنال با دقت قابل قبول دریافت شدند.

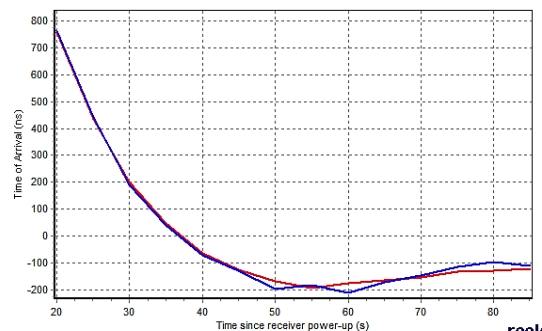
در این تست به علت عدم هم‌زمان‌سازی گیرنده با UTC و همچنین به علت عدم ارسال داده‌های UTC از طرف فرستنده‌های زنجیره‌ی عربستان، امکان هم‌زمان‌سازی گیرنده با زنجیره‌ی عربستان فراهم نشده و محاسبه‌ی ASF به روش TOA نیز میسر نشده است. همچنین این مسئله باعث شد امکان استفاده از سناریوی تست تفاضلی در دو نقطه با عوارض جغرافیایی حد فاصل آنها، جهت بررسی اثر عوارض زمین با مقایسه‌ی مقادیر TOA آن‌ها امکان‌پذیر نشود.

تحلیل ۴ - انتخاب نقاط تست: علاوه بر در نظر گرفتن توپوگرافی و هدایت الکتریکی زمین در انتخاب نقاط تست، نکته‌ی تاثیرگذار دیگر بر روی نتایج تست هنگام استفاده از نتایج TD، موقعیت مکانی محل مورد آزمایش نسبت به ایستگاه‌ها است. شکل ۹ هذلولی‌های سازنده‌ی TD در محل تست کبگان را نشان می‌دهد. با توجه به شکل این هذلولی‌ها،

تحلیل ۱ - اثر فاصله از فرستنده در قدرت سیگنال: با توجه به این که طبق تست‌های صورت گرفته در شهر تهران، قدرت سیگنال دریافتی از ایستگاه فرستنده‌ی سلوا و نسبت سیگنال به نویز آن در این شهر، خیلی پایین است، نقاط تست باید نسبت به محل ایستگاه سلوا با فاصله‌ی کمتر انتخاب می‌شد.

تحلیل ۲ - اثر دقت کلاک گیرنده در محاسبه‌ی ASF: در برخی نقاط، سیگنال قوی‌تری از ایستگاه‌های زنجیره عربستان دریافت شده است و در برخی نقاط سیگنال‌ها ضعیف‌تر هستند. در منطقه کبگان مدوله‌سازی هر سه ایستگاه فرستنده از زنجیره‌ی عربستان به درستی دریافت شده و سیگنال Eurofix [۲۹] برای DGPS نیز دریافت شده است، اما اطلاعات UTC در این سیگنال از این زنجیره، موجود نبود. به علت این که کریستال گیرنده‌ی مورد استفاده از دقت کافی برخوردار نیست، نمودارهای TD یا TOA اندازه‌گیری شده از سیگنال‌های دریافتی از ایستگاه‌ها، با نوسان همراه است و این نوسان نسبت مستقیمی با میزان خطای کلاک گیرنده در اثر خطای کریستال آن دارد. برای مثال در شکل‌های ۷ و ۸ که مربوط به منطقه‌ی کبگان است، به ترتیب تغییرات سیگنال‌های TOA دو ایستگاه اصلی و سلوا (تغییرات نسبت به میانگین مقدار TOA) و سیگنال خطای کلاک گیرنده آمده‌اند. همبستگی بین این داده‌ها ۰/۹۷۴ است و نشان‌دهنده‌ی همبستگی و ارتباط زیاد این دو متغیر است. در شکل‌های ۷ و ۸ نیز این مسئله قابل مشاهده است.

برای مناطق دیگری که تست صورت گرفته بود، نیز متغیر همبستگی نزدیک ۱ است که نشان‌دهنده‌ی آن است که تغییرات TOA دیده شده در این تست‌ها عمدتاً ناشی از خطای کلاک گیرنده است. بنابراین، برای داشتن نتایج دقیق‌تر نیاز به استفاده از کلاک دقیق‌تری در گیرنده است.



شکل ۷: نمودار تغییرات TOA (نسبت به میانگین آن) دو ایستگاه اصلی و سلوا سیگنال‌های دریافتی در منطقه کبگان

باید نقاط با حساسیت کم‌تر (hdop کم‌تر) برای تست انتخاب شوند.



شکل ۹: هدلولی‌های سازنده‌ی TD در منطقه‌ی کبگان

محاسبات تئوری در نرم‌افزار Matlab و با در نظر گرفتن PF، تعیین شده است. سپس با توجه به فاصله‌های فرستنده‌ها و گیرنده و با استفاده از نمودار و معادلات تعیین SF در [۲۲]، SF محاسبه شده است. در ادامه با محاسبه‌ی اختلاف مقدار اندازه‌گیری شده با مقدار محاسبه شده با در نظر گرفتن PF و SF در آن نقطه، ASF بدست آمده است.

طبق جدول ۲، ملاحظه می‌شود که ASF های بدست آمده در اکثر نقاط اندازه‌گیری و برای زوج ایستگاه اصلی و سلوا در محدوده‌ی نزدیک به هم هستند. علت این مسئله آن است که این نقاط در شرایط نسبتاً مشابهی از لحاظ توپوگرافی و هدایت الکتریکی نسبت به زوج ایستگاه فرستنده‌ی اصلی و سلوا قرار دارند. لیکن، در منطقه‌ی کلمه با توجه به شرایط کوهستانی مقدار ASF نسبت به نقاط دیگر متفاوت است. علت این مسئله آن است که موقعیت این منطقه نسبت به زوج ایستگاه فرستنده، وابسته به نوع و ارتفاع منطقه کوهستانی نسبت به جهت دریافت سیگنال از طرف هر یک از زوج ایستگاه فرستنده است.

در مورد انحراف معیار تغییرات اندازه‌گیری TD و در نتیجه ASF، مشاهده می‌شود که این مقدار برای منطقه کبگان نسبت به نقاط دیگر کوچک‌تر است که علت آن، کیفیت و قدرت بالاتر سیگنال و همچنین نسبت سیگنال به نویز بالاتر در این منطقه است.

دستاوردهای تست میدانی

طبق نتایج و تحلیل‌های بدست آمده، مزایا و معایب زیر را می‌توان برای دو روش میدانی TD و TOA بیان کرد:

مزایا و معایب روش میدانی TD

- عدم نیاز به هم‌زمانی با UTC
- عدم نیاز به دقت بالای کریستال
- وابسته به نقطه اندازه‌گیری و عدم امکان درون‌یابی
- عدم امکان استفاده‌ی مستقیم از نقاط تست میدانی جهت اعتبارسنجی محاسبات تئوری

مزایا و معایب روش میدانی TOA

- نیاز به هم‌زمانی گیرنده با UTC
- نیاز به دقت بالای کریستال در گیرنده
- امکان درون‌یابی
- امکان استفاده‌ی مستقیم از نقاط تست میدانی جهت اعتبارسنجی محاسبات تئوری
- نیاز به اضافه شدن کانال داده‌ی لورن برای ارسال UTC (یا یک جایگزین دیگر)
- نیاز به هم‌زمان‌سازی دقیق فرستنده‌ها با UTC برای ارسال سیگنال‌ها

تحلیل ۵ – اثر نوع و جهت آنتن: همچنین در این تست، موضوع تاثیرگذار بر نتایج تست، نوع آنتن مورد استفاده و جهت آن است. نتایج داده‌های در حرکت به علت استفاده از آنتن H و اثر تغییر جهت آنتن در نتایج آن، برای تحلیل ASF قابل استفاده نیستند. همچنین در تست‌های در محل ثابت نیز، با چرخاندن آنتن H، نسبت سیگنال به نویز و دقت سیگنال تغییر می‌کند که نشان‌دهنده‌ی اهمیت جهت آنتن H است.

تحلیل ۶ – انواع خطاهای مشاهده شده در تست‌های میدانی: در محاسبه و اندازه‌گیری ASF به طور کلی خطاهای زیر مشاهده شدند:

- تخمین نادرست مختصات آنتن فرستنده‌ها و گیرنده و عدم تطابق آن با مدل
- مشکل در کالیبراسیون فرستنده‌ها
- تنوع هدایت الکتریکی و نفوذپذیری مسیر انتشار و در نتیجه تنوع سرعت انتشار در طول مسیر
- تغییر در شرایط آب و هوایی در طول اندازه‌گیری اختلاف زمانی

نتایج محاسبات و اندازه‌گیری‌های ASF در روش TD

همان‌طور که بیان شد، در روش TD، ASF هر نقطه نسبت به هر زوج ایستگاه فرستنده تعیین می‌شود. به این صورت که اختلاف زمان دریافت سیگنال از یکی از ایستگاه‌های فرستنده از اختلاف زمان دریافت سیگنال نسبت به ایستگاه فرستنده‌ی دیگر کم می‌شود. سپس همین محاسبه برای حالتی که کل مسیر دریا باشد محاسبه گردیده (جهت یافتن PF و SF) و اختلاف این دو مقدار، ASF آن نقطه را نسبت به آن زوج ایستگاه نتیجه می‌دهد. در جدول ۲، TD با استفاده از

جدول ۲. جدول TD اندازه گیری شده و محاسبه شده در نقاط تست جهت یافتن ASF

مکان	TD ایستگاه سلوا نسبت به مستر با تست میدانی (us)	TD ایستگاه سلوا نسبت به مستر از طریق محاسبه (همراه با PF) (us)	اختلاف TD های محاسبه شده و اندازه گیری شده (us)	SF(us)	ASF (us)	انحراف معیار تغییرات ASF (us)
اسکله جلالی	11904.200	11906.724	2.52359	0.657659	1.865931	0.036
بربو	11790.450	11793.084	2.63351	0.712581	1.920929	0.044
کبگان	11669.550	11672.241	2.69136	0.772220	1.91914	0.017
خورموج	11728.000	11730.687	2.68737	0.746917	1.940453	0.080
کلمه	11759.350	11761.522	2.1718	0.730202	1.441598	0.026

سامانه باید یک چارچوب زمانی بر اساس کلاک روبیدیوم هم‌زمان شده با GPS تولید کند.

جمع‌بندی

در این مقاله، ابتدا به بیان تعاریف و مفاهیم ASF و روش‌های تعیین و محاسبه‌ی ASF پرداخته شد. سپس الگوریتم و راهکاری مناسب برای تعیین آن پیشنهاد شد و با توجه به امکانات فعلی کشور که هنوز سامانه لورن در آن فعال نگردیده است، راهکاری جهت تحلیل و تعیین عملیاتی آن با استفاده از سامانه‌های لورن فعال در کشور عربستان ارائه گردید. همچنین روشی برای اعتبارسنجی و تحلیل این روش نیز ارائه شد. سپس این روش پیشنهادی، به صورت میدانی مورد آزمایش قرار گرفت و داده‌های آن تحلیل شد. دو روش محاسبه‌ی میدانی ASF بر مبنای TD و TOA پیشنهاد شد و مورد تحلیل و تست قرار گرفت. همچنین مزایا و معایب این دو روش بیان شد و با هم مقایسه گردید. در پایان نیز پیشنهادهایی جهت ادامه تحقیقات و انتخاب روش مناسب ارائه شد.

طبق نتایج بدست آمده، به نظر می‌رسد که محاسبه‌ی ASF در روش TD مستلزم اندازه‌گیری‌های میدانی بیش‌تری در منطقه‌ی وسیع یک کشور است و کم‌تر می‌توان از محاسبات نرم‌افزاری کالیبره شده یا درون‌یابی به منظور کاهش هزینه‌های تست میدانی استفاده کرد. از سوی دیگر محاسبه‌ی ASF با روش TOA مستلزم تجهیزات و سنسورهای دقیق‌تری نسبت به روش TD است. همچنین فناوری مورد استفاده در زنجیره، با فرض مکان‌یابی با استفاده از اندازه‌گیری‌های TOA از نسل بالاتری برخوردار است. با توجه به اهمیت تهیه‌ی نقشه‌ی ASF برای بکارگیری در سامانه‌ی لورن ملی، ضروری است که تصمیم‌گیران اصلی این پروژه در این خصوص با ملاحظات بیش‌تری عمل نمایند.

با توجه به مزایا و معایب ذکر شده، می‌توان روش مناسب را جهت استفاده در محاسبات و اندازه‌گیری ASF انتخاب نمود. نکات زیر باید جهت انتخاب روش مناسب، مورد توجه قرار گیرند:

- ۱- نیاز به راه‌اندازی هر سه ایستگاه فرستنده در سامانه‌ی لورن ملی برای استفاده از روش میدانی TD (یا حداقل دو ایستگاه فرستنده)
- ۲- نیاز به اضافه کردن کلاک دقیق (برای مثال دریافت از یک گیرنده‌ی کلاک دقیق از GPS) و هم‌زمان‌ساز به سامانه گیرنده، با استفاده از داده‌های UTC در داده‌های دریافتی از GPS جهت استفاده در روش میدانی TOA
- ۳- نیاز به اضافه کردن کانال داده لورن جهت ارسال داده‌های UTC جهت استفاده در روش میدانی TOA
- ۴- نیاز به تهیه یا ساخت تجهیزات سخت‌افزاری مناسب تست جهت اندازه‌گیری کامل‌تر و دقیق‌تر. اجزای این سیستم اندازه‌گیری باید شامل آنتن دریافت سیگنال لورن، گیرنده‌ی سیگنال لورن، آنتن دریافت سیگنال GPS، شبیه‌ساز سیگنال لورن (جهت کالیبراسیون تاخیرات زمانی ناشی از مدارات تبدیل سیگنال دریافتی آنالوگ به دیجیتال)، دستگاه تولید کلاک هم‌زمان با GPS و پردازنده‌ی اندازه‌گیری‌های زمان (جهت تولید یک برچسب^{۱۶} زمانی با اندازه‌گیری لبه‌ی سیگنال کلاک) باشد. همچنین، یکی از موضوعات چالش برانگیز در اندازه‌گیری ASF تولید چارچوب^{۱۷} زمانی مناسب و دریافت اندازه‌گیری TOA بر اساس UTC است. این

- [14] P. Swaszek, G. Johnson, R. Hartnett, et al., "Airport ASF Mapping Methodology Update," Proc. 34th Annual Technical Symposium, International Loran Association, Santa Barbara, CA, 18-19 October 2005.
- [15] H. C. W. P and B. M, "ASF quality assurance for eLoran," Proceedings of the 2012 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, Myrtle Beach, SC, pp. 1169-1174, 2012.
- [16] H. Gesny and O. Ravard, "Propagation over irregular terrain in the VHF band: a review of integral equation models," IEEE National Conference on Antennas and Propagation, York, UK, pp. 61-64, 1999.
- [17] R. Shalaev, G. Johnson and R. Hartnett, "The big picture on ASFs: The validity of predicted ASFs over long distances," In Proceedings of the International Loran Association 35th Annual Meeting, Groton, CT, 2006.
- [18] Mohammed, Estimation of loranC Ionospheric signal parameters via ESPRIT algorithm, The Second European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 1-5, 2007.
- [19] L. Sevgi, "Groundwave Modeling and Simulation Strategies and Path Loss Prediction Virtual Tools," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 55, no. 6, pp. 1591-1598, June 2007.
- [20] F. Akleman and L. Sevgi, "A Novel MoM- and SSPE-based Groundwave-Propagation Field-Strength Prediction Simulator," in IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 49, no. 5, pp. 69-82, Oct. 2007.
- [21] L. Zhou, X. Xi, J. Zhang and Y. Pu, "A New Method for Loran-C ASF Calculation over Irregular Terrain," in IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 49, no. 3, pp. 1738-1744, July 2013.
- [22] J. J. Simpson and A. Taflove, "A Review of Progress in FDTD Maxwell's Equations Modeling of Impulsive Subionospheric Propagation Below 300 kHz," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 55, no. 6, pp. 1582-1590, June 2007.
- [23] Xi. Wang, Sh. Zhang and Xi. Sun, "The Additional Secondary Phase Correction System for AIS Signals," Sensors, 17(4), March 2017.
- [24] P. Williams and D. Last, "Extending the range of LoranC ASF modelling," 2004.
- [25] زهرا سلیمانیان، "بررسی فاکتورهای اصلی ایجاد خطا در مکان یابی سیستم لورن"، کنفرانس پژوهش‌های نوین در علوم و مهندسی، قزوین، موسسه آموزش عالی علامه رفیعی، ۱۳۹۵.
- [26] T. Vincenty, "Direct and inverse solutions of geodesics on the ellipsoid with application of nested equations," Survey Review, 23:176, pp. 88-93, 1975.
- [27] Ch. F. F. Karney, "Algorithms for geodesics," Journal of Geodesy, vol. 87, no. 1, pp. 43-55, 2013.
- [28] Documents available on: <https://www.reelektronika.nl>.
- [29] D. Van Willigen, G. W. A. Offermans and A. W. S. Helwig, "EUROFIX: definition and current status," IEEE 1998 Position Location and Navigation
- [1] A. K. Z. Tehrani and A. Pourmohammad, "Acurate and Robust Loran-C Cycle Identification," 2017 IEEE 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT), Moscow, Russia, pp. 1-4, 2017.
- [2] A. K. Z. Tehrani and A. Pourmohammad, "Loran-C cycle identification and ECD estimation in presence of white Gaussian noise," 2016 IEEE 10th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT), Baku, pp. 1-4, 2016.
- [3] Y. Wenhe, H. Yu, Y. Jiangbin, Z. Kunjuan and L. Shifeng, "A joint detection method of cycle-identification for loran-C signal," 2017 13th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), Yangzhou, 2017, pp. 497-502.
- [4] Y. Kim, S. H. Park, T. H. Fang and K. Seo, "A Test of a Loran-C Multi-chain Positioning Method Using ASF Estimates," 2019 European Navigation Conference (ENC), Warsaw, Poland, 2019, pp. 1-5.
- [5] D. Wang, X. Xi, Y. Pu, Y. Fang and Z. Li, "Improved parabolic equation method for narrow-band loran-C ASF prediction over irregular terrain," 2016 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC), Miami, FL, 2016, pp. 1-1.
- [6] Y. Feng and I. Astin, "Remote Sensing of Soil Moisture Using the Propagation of Loran-C Navigation Signals," in IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 12, no. 1, pp. 195-198, Jan. 2015.
- [7] P. Yurong, Z. Lili, X. Xiaoli, L. Jiangfan and G. Yan, "Loran-C ground-wave propagation prediction based on the hybrid FDTD algorithm," 2016 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC), Miami, FL, pp. 1-1, 2016.
- [8] مهدی مدیری، هانیه طباطبایی و رضا عرب صاحبی، "ارزیابی در سیستم زمین پایه لورن و تعیین GDOP روش‌های محاسبه آرایش بهینه ایستگاه‌های فرستنده،" فصلنامه صنایع الکترونیک ۷(۱)، ۱۳۹۵.
- [9] Yi Bian and D. Last, "Eigen-decomposition techniques for Loran-C skywave estimation," in IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 33, no. 1, pp. 117-125, Jan. 1997.
- [10] 1992 Loran-c user handbook – USCG
- [11] P. Swaszek, G. Johnson, R. Hartnett, Ch. Oates and M. Wiggins, "Methods for Developing ASF Grids for Harbor Entrance and Approach," 35th Annual Technical Symposium, International Loran Association, Groton, CT, 24-25 Oct. 2006.
- [12] R. Hartnett, G. Johnson, & P. Swaszek, "Navigating Using an ASF Grid for Harbor Entrance and Approach," Proc. Institute of Navigation, Annual Meeting, Dayton, OH, 6-9 June 2004.
- [13] C. Hargreaves, "ASF Measurement and Processing Techniques, to allow Harbour Navigation at High Accuracy with eLoran", Msc. Thesis, University of Nottingham, 2010.

Symposium (Cat. No.98CH36153), Palm Springs,
CA, USA, pp. 101-108, 1998.