

ارزیابی روش‌های محاسبه GDOP در سیستم زمین پایه لورن

و تعیین آرایش بهینه ایستگاه‌های فرستنده

مهدی مدیری^۱، هانیه طباطبایی^۲، رضا عرب‌صاحبی^۳

۱ دانشیار گروه برنامه‌ریزی شهری - دانشگاه صنعتی مالک اشتر، mmodiri@ut.ac.ir

۲ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد - گروه ژئودزی - دانشکده نقشه‌برداری - دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

۳ دانشجوی دکتری - گروه ژئودزی - دانشکده نقشه‌برداری - دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۰/۳ تاریخ پذیرش: ۹۴/۹/۱۸

چکیده

سیستم زمین پایه لورن یک سیستم ناوبری رادیویی است که با استفاده از فرستنده‌های رادیویی زمین پایه و گیرنده‌ها به زیردریایی‌ها، هوانوردان و کاربران ناوبری زمینی اجازه تعیین موقعیت می‌دهد. دقت سیستم زمین پایه لورن، تحت تأثیر فاکتورهای مختلفی قرار دارد که یکی از مهم‌ترین آنها هندسه ایستگاه‌های فرستنده نسبت به موقعیت گیرنده است. این اثر با استفاده از یک پارامتر بدون بعد به نام ضریب تعدیل دقت (DOP) محاسبه می‌شود. برای محاسبه GDOP روشهای مختلفی وجود دارد که عبارتند از: روش خاص نیمساز، روش عام آزیموتی و روش توریری. در این تحقیق، ضرایب GDOP بر اساس روش‌های مذکور، برای زنجیره سه گرهی Labrador محاسبه و نتایج آنها با هم مقایسه گردید. سپس الگوریتم جدیدی برای محاسبه GDOP مبتنی بر فاصله گیرنده تا فرستنده، مشابه الگوریتم موجود در GPS، ارائه گردید که بر اساس نتایج حاصل برای زنجیره Labrador، این روش در مقایسه با روشهای قبلی نتایج خوش بینانه‌تری ارائه می‌دهد. همچنین الگوریتمی برای یافتن بهترین ترکیب از موقعیت ایستگاه‌های فرستنده با توجه به موقعیت گیرنده ارائه شد. این الگوریتم برای زنجیره Labrador استفاده شد و نتایج نشان داد که این آرایش بهینه ایستگاهها در مقایسه با آرایش موجود برای این زنجیره، کمترین مقدار GDOP را برای گیرنده‌های منطقه فراهم می‌کند.

کلیدواژه

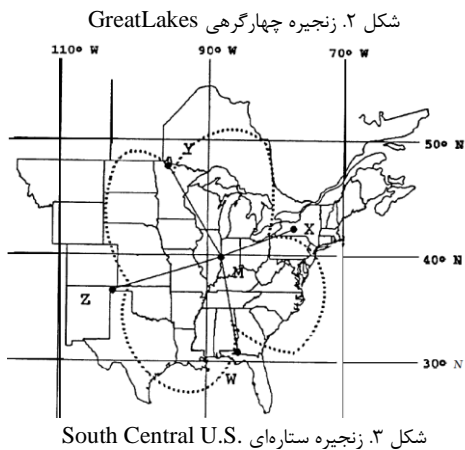
ناوبری، سیستم زمین پایه لورن، ضریب تعدیل دقت، زنجیره سه گرهی، آرایش بهینه

مقدمه

شدند. نزدیکترین زنجیره لورن در همسایگی ایران، زنجیره عربستان است.

سیستم تعیین موقعیت زمین پایه لورن بر اساس اختلاف زمانی پالس‌های دریافتی از فرستنده‌های اصلی^۳ و ثانویه^۴ که در یک شبکه چندگره‌ای قرار دارند، عمل می‌کند. این زنجیره شامل یک ایستگاه اصلی و حداقل دو ایستگاه ثانویه است که ایستگاه‌های ثانویه با اصلی همزمان هستند. بعنوان مثال یک زنجیره نوعی که شامل سه ایستگاه ثانویه (x, y و z) باشد را در نظر بگیرید. ایستگاه ثانویه x، گروه پالسی خود را چند میکروثانیه پس از ایستگاه اصلی ارسال می‌کند و ایستگاههای y و z که سنکرون هستند چند میکروثانیه پس از ایستگاه ثانویه ارسال سیگنال را انجام می‌دهند. گیرنده لورن، اختلاف زمانی گروه پالسی ورودی بین ایستگاه اصلی و ثانویه را اندازه‌گیری می‌کند. موقعیت فرستنده‌ها، میزان تأخیر

از سال ۱۹۴۵ تا دهه ۱۹۷۰، سیستم ناوبری برد بلند (Loran-C)^۱ به وسیله ایالات متحده آمریکا و اتحاد جماهیر شوروی سابق (که سیستم زمین پایه‌ای که توسط شوروی راه‌اندازی گردیده بود چایکا^۲ نام داشت) با ترسیم چشم‌انداز استفاده از این سیستم در کاربردهای نظامی، توسعه یافت. در سال ۱۹۷۰ ایالات متحده آمریکا و کانادا رسماً این سیستم را یک سیستم تعیین موقعیت ملی اعلام کردند که این اقدام باعث استفاده از آن در بخش‌های غیرنظامی گردید [۱]. بریتانیا در سال ۱۹۹۰ با گسترش ناحیه پوشش لورن به اروپای شمال غربی موافقت نمود. ونزوئلا، هند و چین نیز پس از این سال به ناحیه پوشش این سیستم اضافه



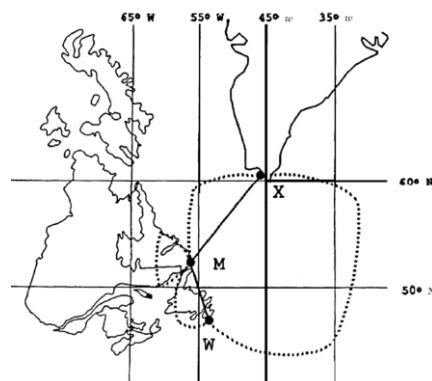
شکل ۲. زنجیره چهارگره‌ی GreatLakes

نمونه‌ای از این ایستگاهها را در شکل‌های (۱) تا (۳) می‌توان مشاهده نمود. برخی از فرستنده‌ها فقط یک کارکرد دارند و در یک زنجیره خاصی نقش ایستگاه اصلی یا ثانویه را ایفا می‌کنند ولی برخی از فرستنده‌ها دارای قابلیت دوگانه^۷ هستند، به این معنی که در یک زنجیره به عنوان ایستگاه اصلی و در زنجیره دیگر نقش ایستگاه ثانویه را دارند. به عنوان مثال، فرستنده Dana در زنجیره شمال غربی ایالات متحده^۸ نقش ایستگاه ثانویه و در زنجیره GreatLakes نقش ایستگاه اصلی را بر عهده دارد. استفاده از فرستنده‌های دوگانه اقدامی مطلوب است، چرا که هزینه‌های مالکیت اراضی و مشکلات موجود برای مکان‌یابی ایستگاهها را کاهش می‌دهد.

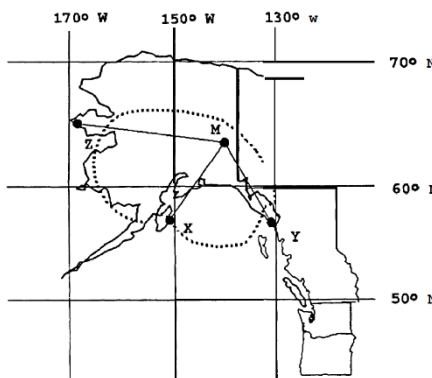
در انتخاب محل ایستگاههای لورن، عوامل مختلفی نظیر نزدیکی به زیرساختهای انرژی، کیفیت مخابراتی مناسب در منطقه، یکنواختی ضریب هدایت زمین، به دور بودن از تداخل امواج آسمانی و زمینی، آرایش هندسی ایستگاهها و ... نقش دارند که دو معیار ضریب هدایت الکتریکی زمین و آرایش هندسی ایستگاهها توأماً در قالب تعیین مدل بهینه پوشش این سامانه مطرح می‌شوند که در این بین، ضریب هدایت زمین با فاکتور نسبت سیگنال به نویز^۹ و آرایش هندسی ایستگاهها با فاکتور^{۱۰} GDOP مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بدیهی است که حالت بهینه بر اساس بیشینه‌سازی پارامتر نسبت سیگنال به نویز و کمینه‌سازی پارامتر GDOP حاصل می‌شود. پارامتر نسبت سیگنال به نویز به عامل محیطی، مشخصات آنتن و فرستنده، وضعیت توپوگرافی منطقه، چگالی اتمسفری و ... وابسته است. درحالی‌که پارامتر GDOP از این حیث ساده‌تر بوده و تنها به موقعیت هندسی ایستگاههای فرستنده نسبت به هم و نیز به موقعیت گیرنده وابسته است که با تغییر موقعیت گیرنده تغییر می‌کند و نقش بسیار مهمی را در تعیین دقت کلی موقعیت گیرنده ایفا می‌کند. بنابراین در تمام روشهای

ارسال سیگنال و سرعت انتشار پالس لورن می‌تواند به صورت دقیق تخمین زده شود. هر سامانه ناوبری دارای خطوط موقعیتی^۵ یا سطوح موقعیتی^۶ است که موقعیت گیرنده از تلاقی دو یا تعداد بیشتری از آنها به دست می‌آید. در سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS)، از سطوح موقعیتی کروی استفاده می‌شود که مرکز آنها موقعیت ماهواره‌ها و شعاع آنها برابر با فاصله ماهواره از ایستگاه اندازه‌گیری است. در سیستم تعیین موقعیت زمین پایه لورن، از خطوط موقعیتی به شکل هذلولی استفاده می‌گردد که مکان هندسی نقاطی را نشان می‌دهد که اختلاف فاصله آنها از دو ایستگاه فرستنده مقدار ثابتی است. از تلاقی دو هذلولی می‌توان به موقعیت گیرنده دست یافت. به همین منظور حداقل سه ایستگاه فرستنده موردنیاز است که از این ایستگاهها، یک ایستگاه نقش ایستگاه اصلی و بقیه، نقش ایستگاههای ثانویه را ایفا می‌کنند. ایستگاه اصلی، ایستگاه ثابت در همه هذلولوی‌ها است.

موقعیت فیزیکی ایستگاههای اصلی و ثانویه یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار بر دقت و منطقه پوششی زنجیره لورن است. زنجیره‌های لورن از لحاظ الگوی موقعیت ایستگاهها متفاوتند و می‌توان این الگوها را به سه دسته کلی تقسیم بندی نمود: سه گرهی، چهارگره‌ی و ستاره‌ای که از پنج ایستگاه یا بیشتر تشکیل می‌شود و یکی از این ایستگاهها، ایستگاه اصلی و مابقی ایستگاهها، ثانویه هستند. زنجیره ستاره‌ای، دارای چهار ایستگاه ثانویه یا بیشتر است.



شکل ۱. زنجیره سه گره‌ی Labrador



7 Dual Rated
8 North East U.S.
9 Signal to Noise Ratio
10 Geometric Dilution of Precision

5 Line Of Position
6 Surface of Position

استفاده شده در این مقاله برای تعیین هندسه بهینه ایستگاههای فرستنده که شامل تمام ایستگاههای فرستنده اعم از ایستگاه اصلی و ایستگاههای ثانویه است، موقعیت ایستگاههای فرستنده نسبت به موقعیت گیرنده محاسبه می‌شود. در این مقاله در بخش دوم به معرفی پیشینه تحقیق و کارهای انجام شده قبلی پرداخته می‌شود. سپس در بخش سوم، روشهای تعیین DOP معرفی می‌شوند که شامل روشهای خاص نیمساز، عام آزیموتی، عام فاصله و توربری می‌باشد. بخش چهارم به معرفی منطقه تست و نتایج عددی اجرای این روشها می‌پردازد. در بخش پنجم به بررسی اثر تعداد ایستگاههای فرستنده بر روی کمیت DOP پرداخته می‌شود. در ادامه، بخش ششم به معرفی روشی برای انتخاب موقعیت بهینه ایستگاههای فرستنده و بخش هفتم به ارزیابی موقعیت بهینه محاسبه شده برای ایستگاههای فرستنده می‌پردازد. در بخش هشتم نیز نتیجه‌گیری ارائه شده است.

پیشینه تحقیق

با توجه به گسترش استفاده از سیستم‌های تعیین موقعیت ماهواره‌ای در سطح نظامی و غیرنظامی و بالا بودن تعداد کاربران این سیستم‌ها، افراد مختلفی در دانشگاهها و مؤسسات تحقیقاتی در زمینه روشهای تعیین و بهبود GDOP مطالعه و تحقیق نموده‌اند. از آنجایی که در زمینه طراحی هندسه فضایی بهینه ماهواره‌های سیستم تعیین موقعیت GPS اقدامات بسیار زیادی انجام شده است و از طرفی روشهای بهینه سازی مورد استفاده در سیستم لورن مشابه این سیستم می‌باشد، ابتدا به نمونه کارهای انجام شده برای سیستم GPS پرداخته و در نهایت به اقدامات محدود انجام شده برای سیستم لورن اشاره می‌شود.

ایندیرا-دوت^{۱۱} و همکاران (۲۰۰۹) بهترین GDOP به دست آمده از دو حالت آرایش هندسی مختلف را مورد بررسی قرار دادند. در حالت اول؛ GDOP برای کلیه ترکیبات چهارتایی از n ماهواره موجود در افق گیرنده محاسبه و مینیمم GDOP به عنوان بهترین آرایش هندسی تعیین گردید. در حالت دوم؛ GDOP برای تمام n ماهواره در افق گیرنده محاسبه شد. مقایسه نتایج حالت اول و دوم، نشان می‌دهد نتیجه به دست آمده از ترکیب n تایی (حالت دوم) مطلوب‌تر است [۲]. میرونووا^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۲) نشان دادند که GDOP وابسته به توزیع مکانی ماهواره‌ها نسبت به موقعیت گیرنده است و هرچه تعداد ماهواره‌های استفاده شده برای ناوبری بیشتر باشد، بهترین مقدار GDOP به دست خواهد آمد. سپس توزیع بهینه آرایش ماهواره‌های در افق دید گیرنده را با استفاده از الگوریتم ژنتیک شبیه سازی کردند [۳]. پژوهشگران دیگری نیز از الگوریتم ژنتیک برای دستیابی به وضعیت بهینه ماهواره‌ها با مقدار

حالت چهار ماهواره صادق است [۱۳]. در سیستم‌های تعیین موقعیت زمین پایه نیز به نسبت تعداد کاربران آنها، اقداماتی در خصوص روشهای محاسبه GDOP صورت گرفته است. تریوری^{۱۴} در سال ۱۹۸۴ بر اساس زوایای جهتی بین گیرنده و فرستنده‌ها، روشی را ارائه نمود که در سیستم‌های تعیین موقعیت غیرفعال^{۱۵} از قبیل سیستم‌های هذلولی کاربرد دارد که در آن موقعیت ایستگاه فرستنده مجهول با استفاده از زمان دریافت سیگنال در حداقل سه ایستگاه تعیین می‌شود. در واقع، سیستم تعیین موقعیت در این حالت به صورت غیرفعال عمل نموده و نحوه تعیین موقعیت مشابه ترفیع فضایی است [۱۴]. گارد ساحلی آمریکا^{۱۶} در سال ۱۹۹۲ روشی برای تعیین GDOP سیستم لورن ارائه داد که به روش خاص نیمساز موسوم است. این روش مبتنی بر تعریف پارامتری است که وابسته به زاویه تقاطع و شیب خطوط موقعیتی در نقطه گیرنده است [۱۵]. پیتر-دانا^{۱۷} در سال ۱۹۹۳ روشی مبتنی بر آزیموت ژئودتیکی امتدادهای بین گیرنده و فرستنده‌ها ارائه نمود که به روش عام آزیموتی موسوم است [۱۶].

روشهای تعیین GDOP

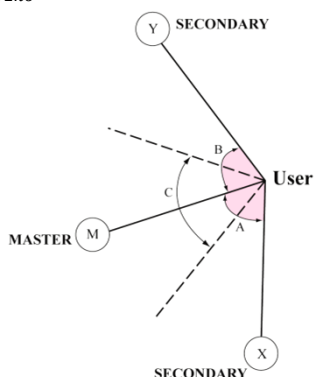
روش خاص نیمساز

فاکتورهای هندسی در تعیین دقت تعیین موقعیت سیستم لورن نقش اساسی را ایفا می‌کنند که از جمله آنها می‌توان به زاویه

13 Wang Huihui
14 Torrieri
15 Passive
16 U.S.Coast Guard
17 Peter H.Dana

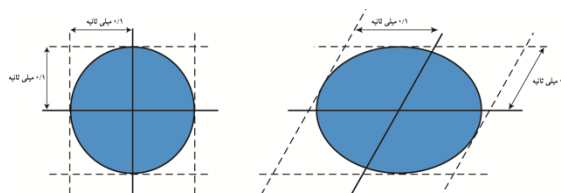
11 Indira Dutt
12 Mironovova

$$GDOP = \frac{2drms}{2\sqrt{2}k\sigma}$$



شکل ۵. تعریف زوایا در معادله دقت

(۲) تقاطع و شیب خطوط موقعیت اشاره نمود که هر دو پارامتر در بخش‌های مختلف منطقه پوششی سیستم، در حال تغییر هستند. زاویه تقاطع به زاویه مابین دو خط موقعیتی اطلاق می‌شود که با تغییر این زاویه، دقت تعیین موقعیت نیز تغییر می‌یابد. از آنجایی که عدم قطعیت برای هر دو خط موقعیتی وجود دارد، ناحیه اطمینان موقعیت ایجاد خواهد شد که موقعیت واقعی کاربر در داخل این منطقه قرار می‌گیرد. زاویه تقاطع بهینه ۹۰ درجه است. در حالتی که زاویه تقاطع بین دو خط موقعیتی برابر ۹۰ درجه باشد، ناحیه حاصل به صورت دایره خواهد بود. چنانچه این زاویه از ۹۰ درجه بیشتر یا کمتر شود، ناحیه اطمینان موقعیت از دایره به بیضی تبدیل می‌شود. بنابراین باید موقعیت ایستگاهها نسبت به هم به گونه‌ای باشد که نواحی با زاویه تقاطع نزدیک به ۹۰ درجه، افزایش یابد. در شکل (۴) می‌توان اثر زاویه تقاطع را بر روی ناحیه اطمینان موقعیت مشاهده نمود.



شکل ۴. نمایش زاویه تقاطع و اثر آن بر ناحیه اطمینان موقعیت

این حالت، حالت خاصی را بررسی می‌کند که وابسته به موقعیت ایستگاه اصلی بوده و از یک ایستگاه اصلی و دو ایستگاه ثانویه تشکیل می‌شود. به عبارتی، این روش در تعداد ایستگاههای فرستنده دارای محدودیت است.

روش عام آزیموتی

برخلاف روش خاص نیمساز که فقط برای زنجیره‌های سه‌گره‌ای قابل استفاده است، روش آزیموتی، روشی کلی است و محدودیتی برای تعداد ایستگاه‌های فرستنده ندارد. در هر نقطه گیرنده، آزیموت ژئودتیکی از گیرنده به سمت فرستنده‌ها محاسبه می‌شود. در نهایت، ماتریس A به صورت زیر تشکیل می‌گردد [۱۶]:

$$A = \begin{bmatrix} \sin(\text{azimuth1}) & \cos(\text{azimuth1}) & 1 \\ \sin(\text{azimuth2}) & \cos(\text{azimuth2}) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \sin(\text{azimuthn}) & \cos(\text{azimuthn}) & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

کمیت GDOP با استفاده از آرایه‌های ماتریس A و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$GDOP = \sqrt{\text{trace}(A^T A)^{-1}} \quad (4)$$

روش عام فاصله

در سامانه لورن، موقعیت با استفاده از اندازه‌گیری اختلاف زمانی دریافت سیگنال در ایستگاه گیرنده از ایستگاه‌های فرستنده محاسبه می‌شود. در این سامانه، موقعیت بر خلاف سامانه‌های GPS که از تلاقی سه دایره در فضای سه بعدی به دست می‌آید، بر مبنای تلاقی دو منحنی هذلولوی انجام می‌شود. هذلولوی مکان هندسی نقاطی است که تفاضل آنها از دو نقطه مشخص، مقدار ثابتی است که این دو نقطه ثابت مکان ایستگاه‌های فرستنده می‌باشد. در سامانه لورن اختلاف فاصله کاربر از دو ایستگاه فرستنده مقدار ثابتی در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر مکان کاربر بر روی هذلولوی قرار دارد. اگر موقعیت کاربر بر روی تلاقی دو هذلولوی

در سیستم لورن، پارامتری که برای بیان این حالات مورد استفاده قرار می‌گیرد، اصطلاحاً 2drms نامیده می‌شود. این پارامتر شعاع دایره‌ای در اطراف موقعیت ظاهری کاربر است که ۹۵٪ موقعیت واقعی کاربر در داخل این دایره قرار می‌گیرد و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$2drms = \frac{2k\sigma}{\sin C} \left[\frac{1}{\sin^2(\frac{A}{2})} + \frac{1}{\sin^2(\frac{B}{2})} + \frac{2\rho \cos C}{\sin(\frac{A}{2})\sin(\frac{B}{2})} \right]^{0.5} \quad (1)$$

که در رابطه فوق، A، B و C زوایایی هستند که کاربر نسبت به موقعیت ایستگاه‌های فرستنده دارد و در شکل (۵) نشان داده شده‌اند. مقدار انحراف استاندارد مشترک برای هر اختلاف زمان است که معمولاً ۰/۱ میکروثانیه در نظر می‌گیرند. k شیب خط پایه است و برابر با نسبت فاصله بین دو TD^{۱۸} مجاور به تفاضل دو LOP است و برحسب ft/μs بیان می‌شود. در نقاط نزدیک خط پایه، خطوط موقعیتی دارای شیب کمتری هستند و بنابراین دقت بیشتر است. در رابطه (۱) این مقدار ثابت و برابر با ۴۹۱/۶۲ ft/s در نظر گرفته می‌شود. ρ ضریب تصحیح بین TD های محاسبه شده است و معمولاً برابر با ۰/۵ در نظر می‌گیرند [۱۵]. پارامتر 2drms متناظر با کمیت GDOP است و بین آنها رابطه زیر برقرار است:

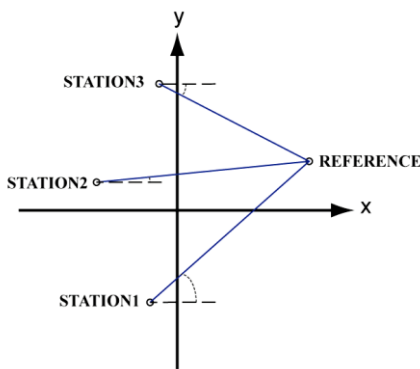
حالتی را در نظر می‌گیریم که فرستنده و سه گیرنده بر روی یک صفحه واقعند. زمان ورود سیگنال ارسال شده از فرستنده در زمان t_0 در سه ایستگاه گیرنده t_1, t_2, t_3 فرض می‌شود. سرعت سیگنال برابر سرعت نور در نظر گرفته می‌شود و اگر طول مسیر انتشار بین فرستنده و ایستگاه i برابر D_i فرض شود، می‌توان نوشت:

$$t_i = t_0 + \frac{D_i}{c} + \epsilon_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (7)$$

که ϵ_i خطای اندازه‌گیری زمان دریافت سیگنال است که تابعی از نویز گیرنده، ناهنجاریهای انتشار و خطای موقعیت ایستگاهها است. برای انتشار در امتداد خط دید از فرستنده به ایستگاهها، بردار R را با بردار R_0 جایگزین می‌کنیم که معرف نقطه مرجع با مختصات (x_0, y_0, z_0) در نزدیکی موقعیت فرستنده است.

مطابق شکل (۸)، زاویه جهتی بین ایستگاه i -ام با مختصات (x_i, y_i) تا نقطه مرجع به مختصات (x_0, y_0) بر روی صفحه از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\Phi_{0i} = \tan^{-1} \left(\frac{y_0 - y_i}{x_0 - x_i} \right), \quad i = 1, 2, 3 \quad (8)$$



شکل ۸. تعریف زوایا برای ایستگاه مرجع و سه ایستگاه

در این صورت، ماتریس کوریانس P برای موقعیت نقطه مرجع به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{12} \\ \sigma_{12} & \sigma_2^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

المانهای ماتریس فوق را از روابط زیر می‌توان به دست آورد:

$$\sigma_1^2 = \alpha [\sigma_{t1}^2 (\sin\Phi_{02} - \sin\Phi_{03})^2 + \sigma_{t2}^2 (\sin\Phi_{01} - \sin\Phi_{03})^2 + \sigma_{t3}^2 (\sin\Phi_{01} - \sin\Phi_{02})^2] \quad (11)$$

$$\sigma_2^2 = \alpha [\sigma_{t1}^2 (\cos\Phi_{02} - \cos\Phi_{03})^2 + \sigma_{t2}^2 (\cos\Phi_{01} - \cos\Phi_{03})^2 + \sigma_{t3}^2 (\cos\Phi_{01} - \cos\Phi_{02})^2] \quad (12)$$

$$\sigma_{12} = \alpha [\sigma_{t1}^2 (\cos\Phi_{03} - \cos\Phi_{02})(\sin\Phi_{02} - \sin\Phi_{03}) + \sigma_{t2}^2 (\cos\Phi_{03} - \cos\Phi_{01})(\sin\Phi_{01} - \sin\Phi_{03}) + \sigma_{t3}^2 (\cos\Phi_{02} - \cos\Phi_{01})(\sin\Phi_{01} - \sin\Phi_{02})]$$

قرار بگیرد، از بی‌نهایت جواب ممکن به جواب واحدی می‌توان دست یافت. می‌توان این معادله را به صورت زیر در نظر گرفت:

$$d_2 - d_1 = \rho = \sqrt{(X_P - X_1)^2 + (Y_P - Y_1)^2} - \sqrt{(X_P - X_2)^2 + (Y_P - Y_2)^2} \quad (5)$$

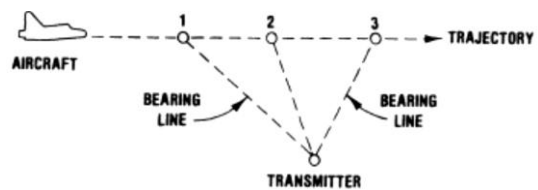
در معادله فوق، نقطه P مکان هندسی گیرنده است که اختلاف فاصله آن از دو ایستگاه فرستنده ۱ و ۲ مقدار ثابت ρ است. با توجه به معادله فوق می‌توان معادلات مشاهدات را تشکیل داد. ماتریس $A = \frac{\partial F}{\partial X}$ از مشتق‌گیری معادلات مشاهدات نسبت به مجهولات (موقعیت ایستگاه گیرنده) به دست می‌آید و می‌توان ماتریس کوفاکتور مجهولات را مطابق فرمول زیر تشکیل داد:

$$C_X = \sigma_0^2 (A^T A)^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_X^2 & \sigma_{XY} & \sigma_{XZ} & \sigma_{XT} \\ \sigma_{YX} & \sigma_Y^2 & \sigma_{YZ} & \sigma_{YT} \\ \sigma_{ZX} & \sigma_{ZY} & \sigma_Z^2 & \sigma_{ZT} \end{bmatrix} \quad (6)$$

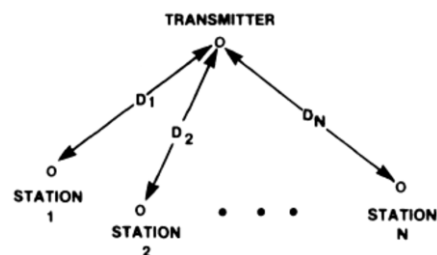
در نهایت $DOP = \sqrt{\text{trace}(\sigma_0^2 (A^T A)^{-1})}$ از رابطه محاسبه می‌شود. این روش، مشابه روش آزیموتی است با این تفاوت که به جای معادله آزیموت بین موقعیت کاربر و فرستنده از معادله اختلاف فاصله بین موقعیت کاربر از دو ایستگاه فرستنده استفاده می‌کند.

روش توربری

در سامانه‌های تعیین موقعیت هیپربولیک، با استفاده از اندازه‌گیری زمان ورود سیگنال در حداقل سه ایستگاه گیرنده می‌توان به موقعیت فرستنده دست یافت. این در صورتی امکان پذیر است که فرستنده و گیرنده‌ها در روی یک صفحه واقع شده باشند، در غیر این صورت نیاز به گیرنده چهارم خواهد بود.



شکل ۶. هندسه فرستنده و گیرنده‌ها در حالت خطی



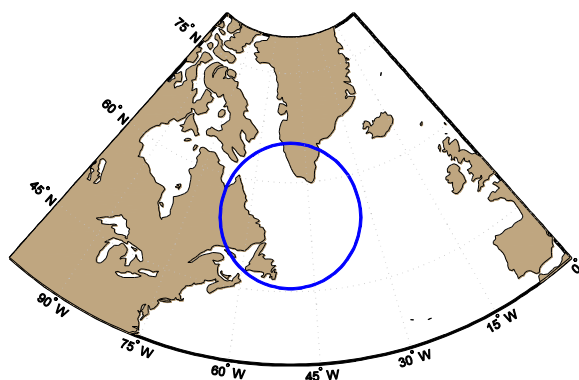
شکل ۷. هندسه فرستنده و گیرنده‌ها در حالت غیرخطی

کاربرد دارد، بنابراین در حالت توزیع نامتقارن گیرنده‌ها که در این مقاله استفاده شده است کاربرد ندارد.

نتایج عددی محاسبه DOP

انتخاب منطقه تست

از آنجایی که روش خاص نیمساز فقط برای زنجیره‌های سه‌گره‌ای طراحی شده است، به منظور اجرای تمام روشها و مقایسه نتایج آنها لازم است زنجیره سه‌گره‌ای در نظر گرفته شود. پس از بررسی‌های انجام شده، در نهایت زنجیره سه‌گره‌ای Labrador به عنوان منطقه تست انتخاب گردید. این منطقه در شکل (۱۰) با دایره آبی رنگ نشان داده شده است.



شکل ۱۰. منطقه تست (Labrador)

موقعیت ایستگاههای موجود در منطقه تست از کتاب راهنمای کاربران لورن که توسط گارد ساحلی آمریکا تهیه شده است، در دسترس بوده و در جدول (۱) آورده شده است [۱۷]:

جدول ۱. موقعیت جغرافیایی ایستگاههای موجود در منطقه Labrador

ایستگاه فرستنده	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
M	55° 42' 27.862" W	52° 22' 35.252"
W	53° 10' 27.606" W	46° 46' 32.286"
X	45° 10' 26.916" W	59° 59' 17.348"

نتایج عددی حاصل از اجرای روش خاص نیمساز

همانگونه که قبلا عنوان شد، این روش برای زنجیره‌هایی که متشکل از سه ایستگاه فرستنده هستند، قابل اجرا است. روش بر روی زنجیره Labrador اجرا شد. به منظور بررسی و محاسبه مقادیر GDOP، لازم است که موقعیت نقطه کاربر معرفی شود. برای این منظور، شبکه‌ای با ابعاد ۰/۵ درجه در منطقه نمایش داده شده در شکل (۱۱) برای تعیین موقعیت کاربر در نظر گرفته شد و مقدار GDOP برای تمام نقاط این شبکه محاسبه گردید. نتایج

(۱۳)

$$\kappa\alpha = c^2 \left[\frac{(\cos\Phi_{01} - \cos\Phi_{02})(\sin\Phi_{02} - \sin\Phi_{03}) - (\cos\Phi_{02} - \cos\Phi_{03})(\sin\Phi_{01} - \sin\Phi_{02})}{\dots} \right]^2$$

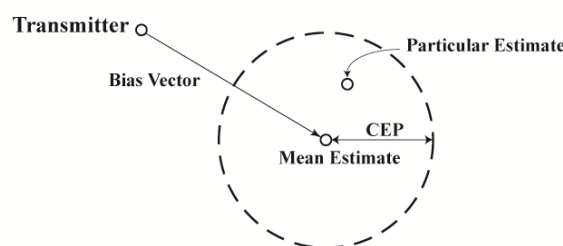
که در رابطه (۱۰)، c سرعت نور است. در صورتی که دو زاویه از سه زاویه فوق باهم برابر باشند، σ_1^2 ، σ_2^2 و σ_{12} به سمت بی‌نهایت میل خواهد کرد و این در صورتی اتفاق می‌افتد که نقطه مرجع در امتداد خط واصل دو ایستگاه باشد. در این روابط σ_{ti}^2 واریانس زمان t_i برای دریافت سیگنال در ایستگاه i است. خطای متوسط مربعی برای فاصله برابر $c^2\sigma_s^2$ خواهد بود که در آن:

$$\sigma_s^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_{ti}^2 \quad (14)$$

واریانس متوسط زمانهای دریافت سیگنال در ایستگاهها و N تعداد ایستگاهها است. ضریب تعدیل هندسی (GDOP) برای سیستم هذلولوی از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$GDOP = \frac{\sqrt{\text{trace}(P)}}{c\sigma_s} \quad (15)$$

این کمیت بیانگر این مطلب است که خطای فاصله تا چه حدی تحت تأثیر ارتباط هندسی بین موقعیت فرستنده و ایستگاهها است. اگر هندسه ایستگاهها به گونه‌ای باشد که واریانس زمانهای دریافت سیگنال تقریباً برابر باشد، به این معنا است که GDOP به صورت ضعیفی به آن وابسته است. کمیت دیگری که برای بیان دقت مورد استفاده قرار می‌گیرد، خطای دایروی محتمل ($CEP^{(9)}$) است. با این فرض که موقعیت برآورد شده فرستنده با بردار تصادفی گوسی دوبعدی بیان می‌شود، کمیت CEP شعاع دایره‌ای است که مرکز آن در میانگین برآوردها واقع است و دربرگیرنده نیمی از بردارهای تصادفی است. در شکل زیر، هندسه این کمیتها نشان داده شده است.

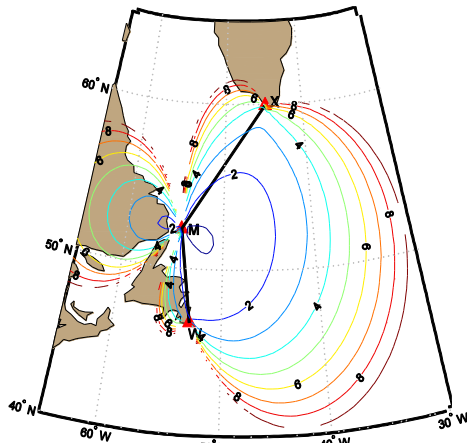


شکل ۹. هندسه موقعیت فرستنده، برآورد متوسط موقعیت، CEP و بردار بایاس

رابطه ریاضی برای محاسبه CEP در رابطه زیر آورده شده است [۱۴]:

$$CEP = (0.75c\sigma_s)GDOP = 0.75\sqrt{\text{trace}(P)} \quad (16)$$

با توجه به اینکه این روش برای حالت‌های خاصی که گیرنده‌ها روی یک خط مستقیم یا با توزیع متقارن گسترده شده باشند

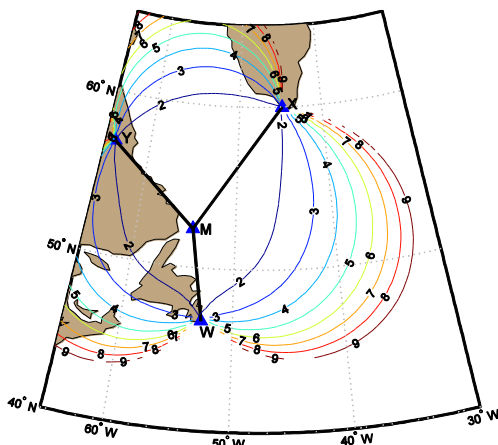


شکل ۱۳. منحنی میزانهای GDOP به دست آمده از روش عام فاصله در منطقه Labrador

از مقایسه شکل‌های (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) می‌توان نتیجه گرفت که روش‌های خاص نیمساز و عام آزیموتی بسیار به هم نزدیک هستند و انطباق بیشتری با منطقه پوشش زنجیره Labrador دارند ولی روش فاصله، مقدار GDOP را به‌طور خوش بینانه‌تری محاسبه می‌کند.

بررسی اثر تعداد ایستگاههای فرستنده بر روی کمیت DOP

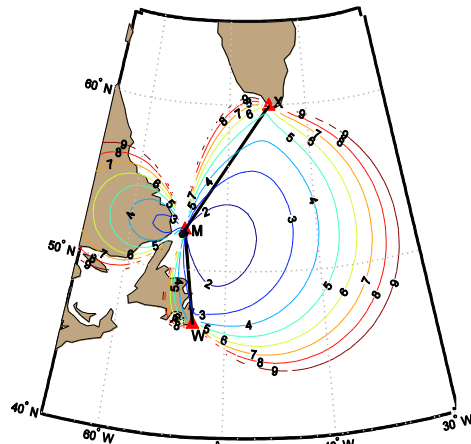
در این بخش، اثر افزایش تعداد ایستگاهها بر روی کمیت DOP مورد بررسی قرار گرفت. به همین منظور ایستگاه فرستنده چهارمی با موقعیت $(57N, 64W)$ در نظر گرفته شد. با در نظر گرفتن روش عام آزیموتی و ایستگاه فرستنده چهارم به عنوان ایستگاه ثانویه، نتایج مطابق شکل (۱۴) به دست آمده است.



شکل ۱۴. منحنی میزانهای GDOP به دست آمده از روش عام آزیموتی با افزودن ایستگاه فرستنده Y در منطقه Labrador

مقایسه شکل (۱۴) با شکل (۱۲)، بیانگر این مطلب است که با افزودن ایستگاه چهارم Y به مجموعه ایستگاههای فرستنده شبکه، منطقه با مقدار GDOP کمتر از ۲، وسعت گسترده‌تری را به خود اختصاص داده است. این موضوع برای سایر منحنی‌های میزان هم

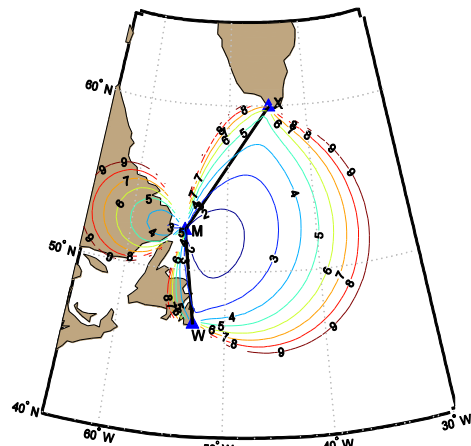
حاصل از این محاسبات در شکل (۱۱) به صورت منحنی میزان-های GDOP قابل مشاهده است.



شکل ۱۱. منحنی میزانهای GDOP به دست آمده از روش خاص نیمساز در منطقه Labrador

نتایج عددی حاصل از اجرای روش عام آزیموتی

در این روش نیز به منظور تعیین موقعیت نقطه کاربر، از همان شبکه استفاده شده در روش قبل استفاده شد و GDOP برای تمام نقاط این شبکه محاسبه گردید که منحنی‌های میزان GDOP در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۲. منحنی میزانهای GDOP به دست آمده از روش عام آزیموتی در منطقه Labrador

نتایج عددی حاصل از اجرای روش عام فاصله

در این حالت نیز مشابه روش قبلی برای تمام نقاط شبکه تعریف شده، مقدار GDOP با استفاده از روش عام فاصله محاسبه گردید که منحنی‌های میزان GDOP در شکل (۱۳) قابل مشاهده هستند.

جدول ۲. موقعیت ایستگاه‌های به دست آمده از الگوریتم عام آزیموتی

ایستگاه فرستنده	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
M	64°W	54°
W	53.1°W	46.8°
X	43°W	64°

مقایسه موقعیت ایستگاه‌های موجود زنجیره ۷۹۳۰ یا زنجیره Labrador که در جدول (۱) آورده شده است با نتایج حاصل از الگوریتم که در جدول (۲) آورده شده است، بیانگر این مطلب است که ایستگاه W به دست آمده بسیار نزدیک به ایستگاه موجود است ولی در مورد دو ایستگاه دیگر تفاوت قابل توجهی وجود دارد. در مرحله قبل، از الگوریتم عام آزیموت به منظور رسیدن به بهترین آرایش ایستگاه‌ها استفاده شد. در این مرحله، مجدداً برنامه برای محاسبه مقدار GDOP برای تمام آرایش‌های ممکن و این بار با استفاده از روش عام فاصله اجرا شد. کمترین مقدار GDOP محاسبه گردید و به این ترتیب، آرایش هندسی ایستگاه‌ها در این حالت به عنوان حالت بهینه آرایش ایستگاه‌ها به دست آمد. جدول (۳) نتایج حاصل را نشان می‌دهد.

جدول ۳. موقعیت ایستگاه‌های به دست آمده از الگوریتم عام فاصله

ایستگاه فرستنده	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
M	64°W	58°
W	53.1°W	46.8°
X	41°W	64°

مقایسه نتایج به دست آمده از این دو حالت، بیانگر این مطلب است که در هر دو حالت موقعیت ایستگاه W یکسان به دست آمده است ولی اختلاف در عرض جغرافیایی نقطه M و طول جغرافیایی نقطه X مشاهده می‌گردد.

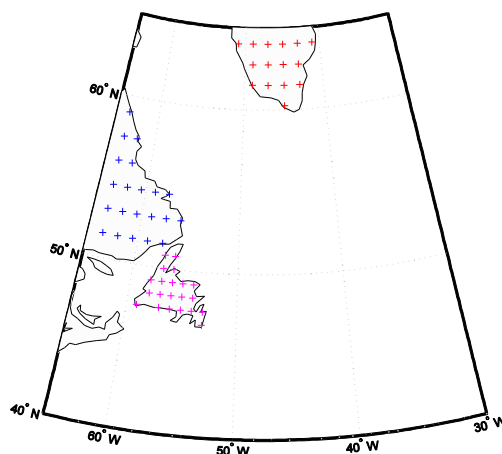
ارزیابی موقعیت بهینه محاسبه شده برای ایستگاه‌های فرستنده

در این مرحله، هدف مقایسه مقدار GDOP با استفاده از ایستگاه‌های موجود و ایستگاه‌های به دست آمده از الگوریتم استفاده شده است تا بتوان در مورد اختلاف موجود به نتیجه رسید. برای این منظور ابتدا بر اساس سه روش خاص نیمساز، عام آزیموتی و عام فاصله و با در نظر گرفتن موقعیت محاسبه شده در جدول (۲) به عنوان موقعیت بهینه ایستگاه‌های فرستنده، مقدار GDOP محاسبه شد که نتایج آن در شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) قابل مشاهده هستند.

برقرار است. به عبارتی، افزایش تعداد ایستگاه‌ها با افزایش میزان دقت تعیین موقعیت، نسبت مستقیم دارد.

انتخاب موقعیت بهینه برای ایستگاه‌های فرستنده

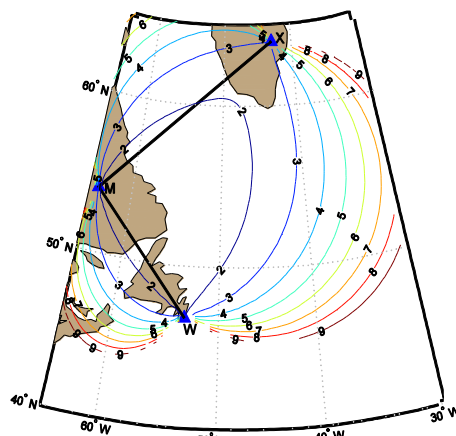
دقت سیستم تعیین موقعیت لورن تحت تأثیر پارامترهای مختلفی است که یکی از آنها هندسه ایستگاه‌های فرستنده است که دربرگیرنده موقعیت هندسی ایستگاه‌های فرستنده نسبت به همدیگر است و نقش بسیار مهمی در دقت تعیین موقعیت نقطه گیرنده روی سطح زمین دارد. همانطور که در بخش قبل بیان گردید، اثر هندسه موقعیت ایستگاه‌های فرستنده بر روی تعیین موقعیت با کمیت DOP بیان می‌گردد. هدف این بخش، یافتن بهترین و بهینه‌ترین حالت برای موقعیت ایستگاه‌های فرستنده است به طوری که به کمترین مقدار GDOP برسیم. برای این منظور منطقه Labrador برای تعیین آرایش هندسی بهینه ایستگاه‌های فرستنده و مقایسه دقت آرایش حاصل با موقعیت ایستگاه‌های موجود منطقه انتخاب گردید. چون در منطقه تست، سه ایستگاه موجود است می‌توان برای هر یک از ایستگاه‌ها یک پنجره جستجو در نظر گرفت. در شکل (۱۵) سه فضای جستجو برای تعیین موقعیت فرستنده‌ها نشان داده شده است.



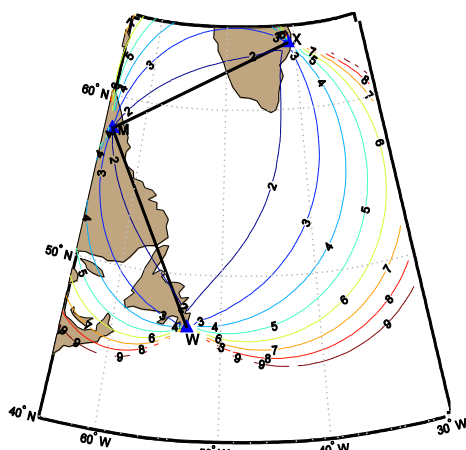
شکل ۱۵. نمایش سه فضای جستجو

در الگوریتم مورد استفاده، با انتخاب یک نقطه در هر پنجره جستجو به عنوان موقعیت فرستنده، مقدار GDOP را برای کل منطقه تست محاسبه نموده و از مقادیر به دست آمده میانگین-گیری شد. برای کلیه ترکیبات سه‌گانه از سه فضای جستجو مقدار میانگین GDOP تعیین گردید و آرایشی که در آن مینیمم مقدار GDOP اتفاق افتاد به عنوان حالت بهینه معرفی گردید. جدول (۲) نتایج حاصل را نشان می‌دهد.

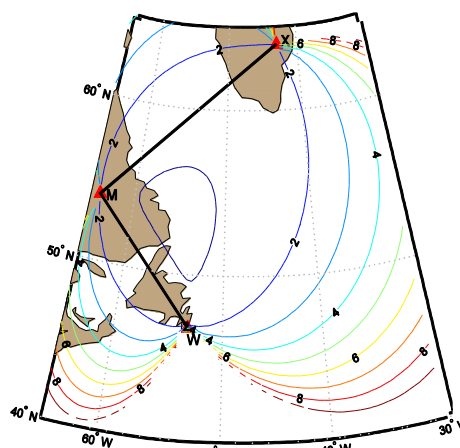
نسبت به شکل‌های مشابه (۱۱) تا (۱۳) نشان دهنده دقت بهتری هستند. به عبارت دیگر، آرایش هندسی ایستگاه‌های فرستنده مطابق جدول (۲) که در این مقاله با هدف دست یابی به موقعیت بهینه ایستگاهها محاسبه شده است، نسبت به آرایش ایستگاههای موجود منطقه تحت عنوان زنجیره ۷۹۳۰ که در جدول (۱) مشخص شده است، با در نظر گرفتن فقط پارامتر GDOP بهینه‌تر است. سپس آرایش ایستگاههای فرستنده مطابق با جدول (۳) که با استفاده از روش فاصله محاسبه گردیده است، مورد ارزیابی قرار گرفت. به همین منظور، با در نظر گرفتن سه روش خاص نیمساز، عام آزیموتی و عام فاصله با استفاده از ایستگاههای ذکر شده در جدول (۳)، نتایج به دست آمده مطابق شکل‌های (۱۹) تا (۲۱) می‌باشد.



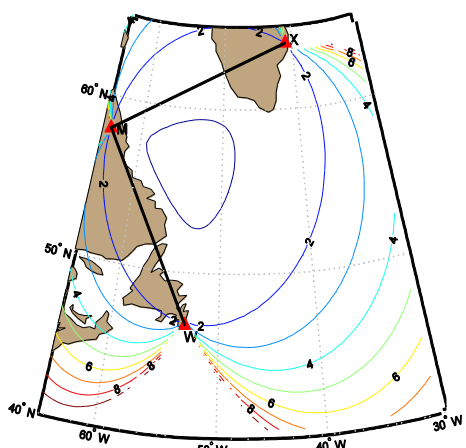
شکل ۱۶. منحنی میزانهای GDOP به دست آمده از روش عام آزیموتی با استفاده از ایستگاههای بهینه محاسبه شده به روش آزیموتی در منطقه Labrador



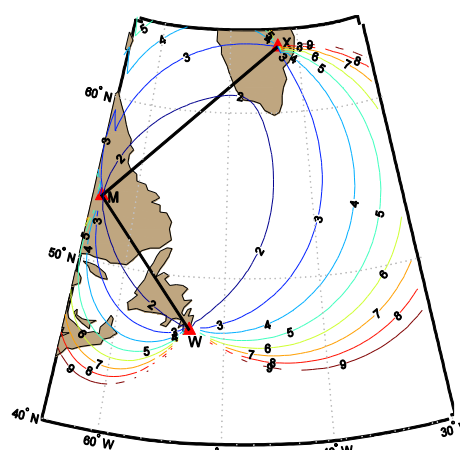
شکل ۱۹. منحنی میزانهای GDOP به دست آمده از روش عام آزیموتی با استفاده از ایستگاههای بهینه محاسبه شده به روش فاصله در منطقه Labrador



شکل ۱۷. منحنی میزانهای GDOP به دست آمده از روش عام فاصله با استفاده از ایستگاههای بهینه محاسبه شده به روش آزیموتی در منطقه Labrador



شکل ۲۰. منحنی میزانهای GDOP به دست آمده از روش عام فاصله با استفاده از ایستگاههای بهینه محاسبه شده به روش فاصله در منطقه Labrador



شکل ۱۸. منحنی میزانهای GDOP به دست آمده از روش خاص نیمساز با استفاده از ایستگاههای بهینه محاسبه شده به روش آزیموتی در منطقه Labrador

با مقایسه شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) و شکل‌های (۱۶) تا (۱۸) به راحتی می‌توان متوجه شد که در شکل‌های (۱۶) تا (۱۸)، منحنی‌ها

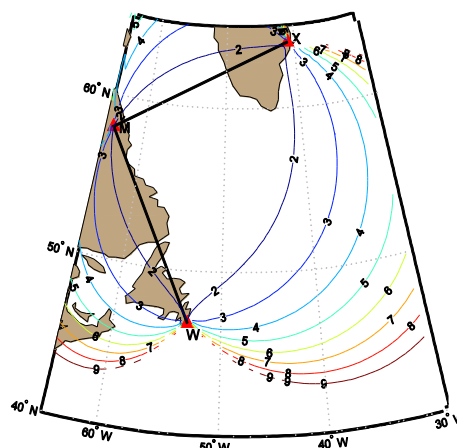
مناسب در منطقه، یکنواختی ضریب هدایت زمین، صاف و هموار بودن زمین سایت، شرایط دسترسی مناسب، کم بودن هزینه (هزینه ساخت ایستگاه و ساختمانهای مورد نیاز، هزینه زیرساختهای مورد لزوم اعم از تجهیزات جلوگیری از رعد و برق، محافظت از آتش، ارتینگ و ...، هزینه پرسنل، نقلیه، ذخایر سوخت، تجهیزات گرمایی، تجهیزات تهویه، هزینه حصارکشی و ...) می‌بایست مد نظر قرار گیرد و پس از بررسی تمام موارد، موقعیت بهینه برای ایستگاهها انتخاب گردد.

نتیجه‌گیری

دقت موقعیت به دست آمده از یک سیستم تعیین موقعیت تحت تأثیر هندسه ایستگاههای فرستنده است که با کمیت DOP بیان می‌شود. این تحقیق، روشهای مختلف موجود برای محاسبه مقادیر GDOP در سیستم‌های زمین پایه لورن را ارائه و بررسی می‌کند و نمونه‌های محاسبه شده در این زمینه را نشان می‌دهد. محاسبات نشان می‌دهد که مقدار این ضرایب به آرایش هندسی ایستگاههای فرستنده، تعداد ایستگاهها و روش انتخابی بستگی دارد. روش خاص برای محاسبه GDOP زنجیره‌های سه‌گره‌ای و روش عام آزیموتی برای محاسبه GDOP زنجیره‌های چهارگره‌ای و ستاره‌ای به عنوان روشهای مناسب پیشنهاد می‌شود. همچنین این تحقیق، روشی برای یافتن بهترین آرایش هندسی ایستگاههای فرستنده سیستم معرفی می‌کند که این آرایش بهینه دارای کمترین مقادیر GDOP می‌باشد. آرایش بهینه به دست آمده با آرایش ایستگاههای موجود مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت. محل نهایی ایستگاههای فرستنده علاوه بر مقدار کمیت DOP، تحت تأثیر قیود فنی و سیاسی هم هست که در نهایت آرایش هندسی ایستگاههای شبکه را تعیین می‌کنند.

مرجع‌ها

- [1] Federal Radio navigation Plan (1988) DOT-TSC-RSPA-88-4, Dept. of transportation, Washington, DC, Dec. 1988.
- [2] V.B.S.Srilatha Indira Dutt & et al, Investigation of GDOP for Precise user Position Computation with all Satellites in view and Optimum four Satellite Configurations, J. Ind. Geophys, 2009, Vol.13, No.3, pp.139-148.
- [3] Martina Mironovova & Hynek Havliš, Calculation of GDOP Coefficient, 2012.
- [4] C.-H. Wu & V.-W. Ho, "Genetic programming for the approximation of GPS GDOP", in proceedings of the International Conference on Machine Learning and Cybernetics (ICMLC), 2010, pp. 2944-2949, Qingdao, China.
- [5] M. R. Mosavi, "Applying Genetic Algorithm to Fast and Precise Selection of GPS Satellites", Asian Journal of Applied Sciences, 2011, Vol. 4, No. 3, pp. 229-237.
- [6] Chih-Hung. Wu, Ya-Wei. Ho, Li-Wun. Chen & You-Dong. Huang. "Discovering approximate expressions of



شکل ۲۱. منحنی میزانهای GDOP به دست آمده از روش خاص نیمساز با استفاده از ایستگاههای بهینه محاسبه شده به روش فاصله در منطقه Labrador

مقایسه شکل‌های (۱۶) تا (۱۸) با شکل‌های (۱۹) تا (۲۱)، بیانگر این مطلب است که آرایش هندسی ایستگاههای فرستنده که از روش عام فاصله به دست آمده است، نسبت به آرایش هندسی ایستگاهها که از روش عام آزیموتی حاصل شده است، دقت بهتری را دارد. ضمناً هر دو حالت نسبت به آرایش ایستگاههای موجود زنجیره ۷۹۳۰ (جدول ۱) دارای دقت تعیین موقعیت بهتری هستند.

می‌توان به این نتیجه دست یافت که در انتخاب محل ایستگاههای لورن، محدودیتهای عملی وجود دارد. اول اینکه وجود یکسری قیود فیزیکی و سیاسی، موقعیت ایستگاهها را محدود می‌کنند. از آنجایی که ایستگاهها لازم است در روی زمین و در محدوده کشورهای همسایه و هم پیمان مستقر شوند، شروط سیاسی و فیزیکی طول‌های پایه و زوایای تقاطع را محدود می‌کند. دوم اینکه قیود فنی نیز محدودیتهایی به اندازه طول‌های پایه تحمیل می‌کند. انتخاب طول پایه بلند الزاماً به معنی دستیابی به دقت بالاتر با منطقه پوششی بهینه سازگار نیست، چراکه محدودیتهای طولی در انتشار سیگنال مانع دریافت همزمان سیگنالها از ایستگاههای خیلی دور می‌شود. اگرچه افزایش طول پایه مفید با افزایش توان فرستنده قابل حصول است، اما معمولاً از طول پایه محدودتری استفاده می‌شود. در ایستگاههای اصلی و ثانویه که در فاصله دورتری از هم واقع شده‌اند، افزایش توان فرستنده الزامی است. همچنین در انتخاب موقعیت ایستگاههای فرستنده لورن، علاوه بر کمیت GDOP و قیود سیاسی و فنی، پارامترهای دیگری هم هستند که باید همه در کنار هم در نظر گرفته شوند. به عنوان نمونه در انتخاب ایستگاه و محل سایت موارد مختلفی نظیر به دور بودن از تداخل امواج (ناشی از امواج آسمانی، تداخل امواج زنجیره‌های اطراف و تداخل امواج ناشی از فرستنده‌های غیر از سامانه لورن)، به دور بودن از تداخلات عمده (شبکه‌های کامپیوتری، سیستمهای امنیت، تجهیزات خطوط هوایی و ...)، کیفیت مخابراتی

- Journal for Science and Engineering, 2012, Vol. 37, No. 7, pp. 2003-2015.
- [12] M. R. Mosavi, "An Effective Method for GPS GDOP Clustering using Ant Colony Optimization Algorithm", Asian Journal of GeoInformatics (In review).
- [13] Wang Huihui & et al, Geometric dilution of precision for GPS single-point positioning based on four satellites, Journal of Systems Engineering and Electronics, Vol. 19, No. 5, 2008, pp.1058-1063.
- [14] DON J. TORRIERI, "Statistical Theory of Passive Location Systems", IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-20, No. 2, pp. 183-198, March 1984.
- [15] U.S. coast Guard. Loran-C User Handbook, CG-462, Washington, DC: U.S. Department of Transportation, 1992.
- [16] Pater H. Dana, Geographic Information System Loran-C Coverage Modeling, Proceedings of the twenty-second Annual Technical Symposium Santa Barbara, California, October 18-21, 1993, Bedford, Massachusetts, Wild Goose Association.
- [17] LORAN-C User Handbook, COMDTPUB, p16562.6, November, 1992.
- GPS geometric dilution of precision using genetic programming". 2012, Advances in Engineering Software 45(1): 332-340.
- [7] Sadaf.Tafazzoli & Mohammad Reza. Mosavi, "Performance Improvement of GPS GDOP Approximation using Recurrent Wavelet Neural Network", Journal of Geographic Information System, 2011, Vol. 3, No. 4, pp. 318-322.
- [8] D. Simon & H. El-Sherief, " Navigation Satellite Selection Using Neural Networks", Journal of Neurocomputing, 1995, Vol. 7, pp. 247-258, doi: 10.1016/0925-2312(94)00024-M.
- [9] D. J. Jwo & C. C. Lai, "Neural Network-Based Geometry Classification for Navigation Satellite Selection", Journal of GPS Navigation, 2003, Vol. 56, No. 2, pp. 291-304, doi:10.1017/ S0373463303002200.
- [10] M. Ranjbar & M. R. Mosavi, "Simulated Annealing Clustering for Optimum GPS Satellite Selection", Journal of Computer Science Issues, 2012, Vol. 9, Issue. 3, No. 3, pp. 100-104.
- [11] M. R. Mosavi & M. Shiroie, "Efficient evolutionary algorithms for GPS satellites classification", Arabian