

## طرح کلی یک سامانه موقعیت‌یابی به‌عنوان پشتیبان GPS

میثم جنابی<sup>۱</sup>، سید محمد علوی<sup>۲</sup>، رضا حق‌میرام<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۹۱/۰۱/۲۲

تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۲/۲۵

### چکیده

یکی از اهدافی که بالقوه می‌تواند در سراسر جهان مورد حمله سیستم‌های جنگ الکترونیک قرار گیرد، سامانه موقعیت‌یابی جهانی یا همان GPS است. اختلال در این سامانه می‌تواند برای کشورهایی که وابستگی محض به این سامانه دارند، نابود کننده باشد. در این خصوص ایجاد یک سامانه بومی در کشور برای موقعیت‌یابی می‌تواند در جهت مدیریت بحران ناشی از تهاجم و کاهش آسیب‌ها نقش بسزایی ایفا نماید.

امروزه با وجود اینکه سیستم‌های ماهواره‌ای مختلفی از جمله GPS ساخته شده‌اند، همچنان نیاز به سیستم‌های پشتیبان احساس می‌شود. در این مقاله تلاش شده است سیستمی تشریح گردد که در کنار GPS و مستقل از آن، عملیات موقعیت‌یابی و ناوبری را با دقتی مناسب به عهده گیرد.

طراحی کلی یک سامانه موقعیت‌یابی که بتواند کاربر پسینو، سرعت مناسب موقعیت‌یابی، فضای زیر پوشش کافی و دقت مناسب در فواصل مختلف داشته باشد، از اهداف این مقاله به‌شمار می‌رود. همچنین می‌توان این سامانه را به‌طور متحرک نیز طراحی نمود به‌طوری که در مواقع بحرانی، امکان تغییر مکان سریع آن وجود داشته باشد. در پایان به تلفیق اطلاعات به‌دست آمده توسط این سامانه، به‌وسیله فیلتر کالمن پرداخته شده است.

**کلیدواژه‌ها:** ناوبری رادیویی<sup>۴</sup>، موقعیت‌یابی رادیویی، VOR، موقعیت‌یابی زمین پایه<sup>۵</sup>، لورن<sup>۶</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد الکترونیک - دانشگاه جامع امام حسین (ع) me.jenabi@gmail.com - نویسنده مسئول

۲- استادیار و عضو هیئت علمی دانشکده فناوری اطلاعات و ارتباطات - دانشگاه جامع امام حسین (ع) smalavi@yahoo.com

۳- استادیار و عضو هیئت علمی دانشکده فناوری اطلاعات و ارتباطات - دانشگاه جامع امام حسین (ع) haghmaram@yahoo.com

4- Radio Navigation

5- Ground base positioning

6- Loran: Long Range Navigation

## ۱- مقدمه

سابقه احساس نیاز به سامانه‌های ناوبری، به جنگ جهانی دوم بازمی‌گردد و بسیاری از سیستم‌هایی که امروزه استفاده می‌شود، از آن زمان پایه‌ریزی شده است. در برخی موارد سامانه‌های ناوبری بر اساس موقعیت‌یابی عمل می‌کنند. البته بدون موقعیت‌یابی دقیق نیز می‌توان عمل ناوبری را انجام داد. برای مثال می‌توان سامانه لورن<sup>۱</sup> را نام برد که در جنگ جهانی دوم توسط آلمان‌ها برای فرود هواپیما در شرایط جوی نامساعد و در تاریکی شب استفاده می‌شد ولی در عمل، موقعیت‌یابی به معنای حقیقی در آن صورت نمی‌گرفت.

موارد زیر، لزوم استفاده از سامانه موقعیت‌یابی بر پایه ایستگاه‌های زمینی را بیان می‌کند:

الف- احتمال جمینگ بر روی سیگنال‌های ماهواره وجود دارد.

ب- در GPS به دید مستقیم نیاز است و استفاده از آن در داخل ساختمان‌ها و تونل‌ها با محدودیت‌هایی مواجه است.

ج- در مواقع خاص مانند جنگ‌ها و ... امکان استفاده از GPS وجود ندارد.

د- سیستم‌های ماهواره‌ای نیز به سیستم پشتیبان نیاز دارند و وابستگی انحصاری به یک سیستم منطقی نیست.

مشخصات سامانه‌های موقعیت‌یابی زمینی به این صورت است:

الف- مکان‌یابی در محدوده معینی بر روی سطح کره زمین انجام می‌گیرد.

ب- پالس‌هایی را توسط ایستگاه‌هایی که در مکان‌های مشخصی بر روی کره زمین نصب شده‌اند، ارسال می‌نمایند.

ج- هواپیماها، کشتی‌ها و هر جسم متحرکی که گیرنده مناسب را داشته باشد می‌تواند با دریافت این پالس‌ها موقعیت جغرافیایی خود را تعیین نماید.

از جمله مهم‌ترین و پرکاربردترین سامانه‌های موقعیت‌یابی، سامانه لورن است. از این سامانه نسخه‌های متعددی ساخته شده و به صورت عملیاتی مورد استفاده قرار گرفته است.

لورن نسخه A در سال ۱۹۴۲ توسط نیروهای نظامی ایالات متحده، عملیاتی گردید که دقت آن در حدود ۲ تا ۳ کیلومتر در محدوده ۱۰۰۰ کیلومتر بود. نسخه بعدی آن لورن B بود که در بین سال‌های ۱۹۴۸ تا ۱۹۵۵ بر پایه لورن A طراحی شد و پس از آن لورن C و سپس لورن D طراحی شدند [۳] و [۴]. سیستم لورن D یک سیستم انحصاری برای مقاصد نظامی بود و با برد کوتاه و پوشش‌دهی کم، ولی با دقت بسیار خوب مورد استفاده قرار می‌گرفت. این سیستم در دهه ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ برای عملیات ناتو در اروپا استفاده می‌شد. سامانه لورن C، در سراسر کره زمین اجرایی شده و تعداد زیادی از ایستگاه‌های فرستنده آن ساخته و نصب شده‌اند. البته به علت گسترش روزافزون سیستم‌های ماهواره‌ای از دهه هشتاد میلادی به

بعد، استفاده از آن سامانه برای مدتی متوقف گردید. نسخه جدید لورن با نام eLoran<sup>۲</sup> به‌عنوان پشتیبان و مکمل سیستم‌های ماهواره‌ای طبق دستور رئیس‌جمهور ایالات متحده در سال ۲۰۰۴ راه اندازی شد و این سامانه در حال اجرا و گسترش می‌باشد [۳ و ۴].

غیر از سامانه لورن، سامانه‌های دیگری نیز به مرحله اجرا درآمده است که از آن جمله سامانه دکا<sup>۳</sup> و امگا<sup>۴</sup> است. دکا نیز در خلال جنگ جهانی دوم طراحی شده و در سال‌های ۱۹۴۶ تا ۲۰۰۱ عملیاتی بود. این سیستم نیز همانند سیستم لورن، یک سیستم موقعیت‌یابی هذلولی است. سامانه امگا بر خلاف دو سیستم دیگر، پوشش سراسری داشته و با دو روش هذلولی و مستقیم عمل می‌کند ولی دقت خوبی در موقعیت‌یابی ندارد [۵]. علاوه بر سامانه‌های موقعیت‌یابی هذلولی که در بالا ذکر شد، سامانه‌هایی نیز وجود دارند که بر اساس اندازه‌گیری زاویه و فاصله عمل می‌کنند. از جمله این سامانه‌ها، سامانه VOR/DME<sup>۵</sup> می‌باشد [۳].

لزوم طراحی سامانه‌ای که ضمن الگوبرداری از سیستم‌های موفق موجود، از تکنولوژی روز در آن استفاده شده و معایب آن‌ها را به حداقل برساند غیرقابل انکار است.

در این مقاله تلاش شده است ضمن معرفی اجمالی دو سامانه لورن C و VOR، طرح کلی سیستمی ترکیبی پیشنهاد شود و مجالی برای محققان، برای تحقیق در مورد قسمت‌های مختلف این سامانه فراهم شود. سامانه طراحی شده، علاوه بر سرعت و دقت مناسب در فواصل گوناگون، از نظر مخابراتی برای کاربر پسیو طراحی شده و هیچ‌گونه وابستگی به استفاده از ماهواره ندارد. همچنین امکان ساخت ایستگاه‌های متحرک نیز وجود دارد.

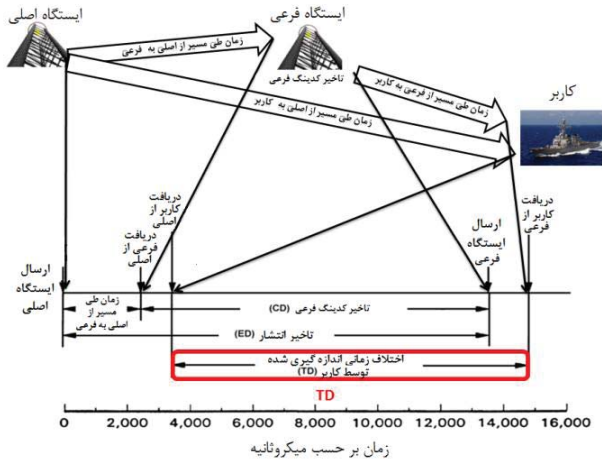
## ۲- شرح عملکرد دو نمونه از سیستم‌های پیشین

با توجه به این مشخصات، تلاش شده است مزایای سیستم‌های مختلف در یک سیستم جمع شود. بنابراین سامانه‌های موقعیت‌یابی لورن C، دکا، امگا، VOR/DME، TACAN<sup>۶</sup>، GPS و همچنین سامانه‌های ناوبری ADF<sup>۷</sup>، ILS<sup>۸</sup>، TRSB<sup>۹</sup> مورد بررسی قرار گرفت که برخی از مشخصات آن‌ها در جدول (۱) در ضمیمه الف آمده است. همچنین دقت این سامانه‌ها در نمودار شکل (۱) مقایسه شده است [۶]. با توجه به دقت و سرعت سامانه لورن و همچنین ناوبری مناسب در VOR از این دو سامانه در طراحی سامانه پیشنهادی استفاده شده است و در ادامه به معرفی آن‌ها پرداخته می‌شود.

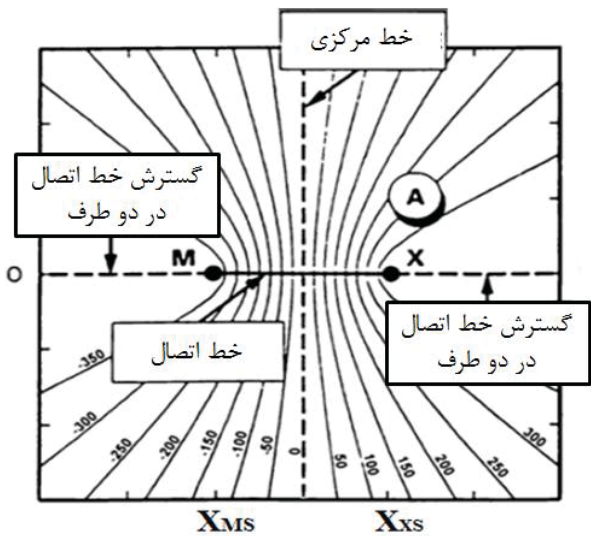
2- Enhanced Loran  
3- DECCA  
4- OMEGA  
5- VOR: VHF Omnidirectional Range  
DME: Distance Measuring Equipment  
6- Tactical air navigation system  
7- Automatic Direction Finder  
8- Instrument Landing System  
9- Time Referenced Scanning Beam

1- Lorenz

شکل (۳) در نظر می‌گیریم [۷]. اگر فاصله کاربر را از ایستگاه اصلی،  $D_M$  و فاصله آن را از ایستگاه فرعی،  $D_X$  بنامیم، روابط زیر صادق است.



شکل ۲- نحوه ارسال سیگنال‌های لورن C



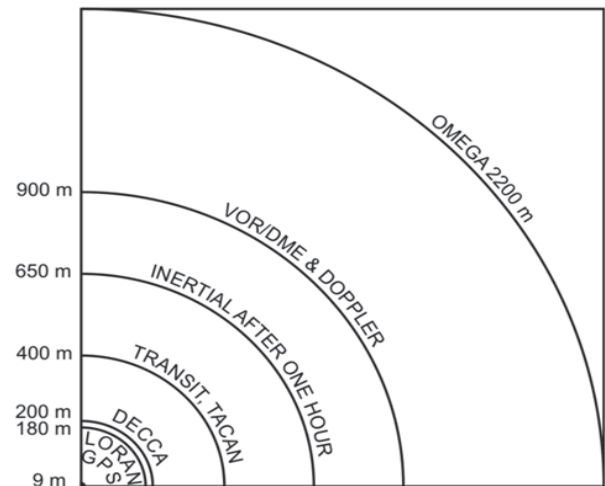
شکل ۳- هندلولی‌های موقعیت Loran C

$$D_M = \sqrt{(X_A - X_{MS})^2 + Y_A^2} \quad (2)$$

$$D_X = \sqrt{(X_A - X_{XS})^2 + Y_A^2} \quad (3)$$

$$X_{TD} = D_M - D_X \quad (4)$$

$$X_{TD} = \sqrt{(X_A - X_{MS})^2 + Y_A^2} - \sqrt{(X_A - X_{XS})^2 + Y_A^2} \quad (5)$$



شکل ۱- مقایسه دقت چندسیستم موقعیت یابی

### ۱-۲- نحوه موقعیت یابی در سامانه لورن C

لورن یک سیستم موقعیت یابی است که در آن ایستگاه‌هایی در نقاط مختلف در یک محدوده جغرافیایی بر روی سطح زمین نصب می‌شود. به مجموعه ایستگاه‌هایی که در این محدوده قرار دارند یک زنجیره گفته می‌شود.

هر زنجیره شامل یک ایستگاه اصلی و حداقل دو فرعی در محدوده تحت پوشش همدیگر می‌باشد. این ایستگاه‌ها، پالس‌هایی را با یک نظم مشخص ارسال می‌کنند و گیرنده با توجه به زمان دریافت این پالس‌ها موقعیت خود را محاسبه می‌نماید.

شکل (۲)، زمان بندی ارسال پالس توسط ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد. ایستگاه اصلی به‌طور متناوب در بازه‌های زمانی مشخص و ثابتی سیگنال خود را منتشر می‌کند. پس از انتشار این سیگنال و سپری شدن زمانی موسوم به زمان طی خط اتصال دو ایستگاه، ایستگاه فرعی این سیگنال را دریافت می‌کند و پس از مدت موسوم به CD به سیگنال خود را ارسال می‌کند. دو سیگنال منتشر شده از ایستگاه‌های اصلی و فرعی با یک اختلاف زمانی موسوم به TD به گیرنده کاربر می‌رسد. گیرنده این اختلاف زمان را محاسبه کرده و از آن برای موقعیت یابی استفاده می‌کند [۷].

با ضرب TD در سرعت امواج الکترومغناطیسی، پارامتر جدیدی حاصل می‌شود که آن را  $X_{TD}$  می‌نامیم (رابطه ۱).

$$X_{TD} = c \times TD \quad (1)$$

با توجه به تعریف هندلولی، همان ثابت هندلولی است. هندلولی‌های رسم شده توسط  $X_{TD}$  های مختلف در شکل (۳) نشان داده شده است. یک ایستگاه اصلی را در نقطه  $X_{MS}$  و یک ایستگاه فرعی را در نقطه  $X_{XS}$  و کاربر A را در نقطه  $(X_A, Y_A)$  مانند

حال به جای سیگنال نوری، فرستنده‌های VOR دو سیگنال رادیویی VHF از یک مرکز ارسال می‌کنند. یکی از این سیگنال‌ها، شبیه آن نور سفید است که فاز مرجع نامیده شده و همه جهته بوده و با یک الگوی دایره‌ای از ایستگاه منتشر می‌شود. فاز این سیگنال در تمام ۳۶۰ درجه ثابت است. سیگنال دیگر شبیه نور سبز بوده که آن را فاز متغیر می‌نامیم و به صورت یک میدان چرخشی ارسال می‌شود. کار سامانه VOR بر اساس مقایسه اختلاف فاز بین دو سیگنال می‌باشد؛ یکی از این سیگنال‌ها دارای فاز ثابت برابر صفر بوده (فاز مرجع) و دیگری دارای فاز متغیر می‌باشد، به نحوی که اگر گیرنده در شعاع صفر درجه باشد، سیگنال فاز ثابت هم‌فاز با سیگنال فاز متغیر است و اگر گیرنده در شعاع ۴۵° باشد اختلاف فاز سیگنال فاز ثابت با سیگنال فاز متغیر ۴۵° خواهد بود. اندازه‌گیری این اختلاف فاز مستقیماً به سمت‌یابی کاربر نسبت به ایستگاه فرستنده منجر می‌شود. استفاده از باند VHF سبب شده است که ارتباط در شب و روز و انواع شرایط جوی و فواصل مختلف با کمترین تداخل امواج آسمانی صورت گیرد [۱].

از معایب این سیستم می‌توان به استفاده از فرکانس بالا، که به دید مستقیم نیاز دارد و در فواصل طولانی قابل پیاده‌سازی نخواهد بود، اشاره کرد. حداکثر رنج عملیاتی این سامانه ۲۴۰ کیلومتر می‌باشد.

### ۳- تشریح کلی سامانه پیشنهادی

هر ایستگاه در این سامانه از سه بخش VOR، لورن VHF و لورن LF تشکیل می‌شود. این ایستگاه‌ها موقعیت خود را برای گیرنده کاربر ارسال می‌کنند. بخش VOR، مشابه سیستم معرفی شده می‌باشد. از آنجا که VOR در باند فرکانسی VHF کار می‌کند و در نتیجه، به دید مستقیم بین فرستنده و گیرنده نیاز دارد، در فواصل نزدیک قابل استفاده است. با توجه به اینکه بخش لورن VHF نیز در همان فرکانس کار می‌کند، این دو بخش از ایستگاه‌ها فقط در فواصل نزدیک و متوسط کاربرد دارند.

در فواصل طولانی‌تر، این سیستم مشابه سیستم لورن عمل می‌کند و از بخش لورن LF برای موقعیت‌یابی استفاده می‌شود.

با توجه به اینکه سامانه لورن در محدوده‌های نزدیک به ایستگاه و مخصوصاً در محدوده امتداد خط واصل دو ایستگاه دقت پایینی دارد، در این محدوده از سامانه VOR کمک گرفته می‌شود. همچنین دقت سامانه VOR با افزایش فاصله کاهش می‌یابد؛ لذا در فواصل متوسط از لورن VHF و در فواصل دورتر از لورن LF استفاده می‌شود. با اینکه لورن C سیستم شناخته شده‌ای است ولی فرکانس پایین آن خطای زیادی ایجاد می‌کند که برای جبران خطای آن در فواصل نزدیک و متوسط از لورن VHF استفاده شده است.

برای موقعیت‌یابی در فواصل بسیار طولانی، چاره‌ای جز استفاده از

در رابطه (۵) فقط مقادیر  $X_A$  و  $Y_A$  مجهول است. می‌توان با در نظر گرفتن یک ایستگاه فرعی دیگر در نقطه‌ای دیگر، همین روابط را برای آن نیز نوشت و در نتیجه این دو مجهول را با استفاده از دو رابطه مذکور به دست آورده و موقعیت کاربر به این شکل تعیین می‌گردد [۷، ۹].

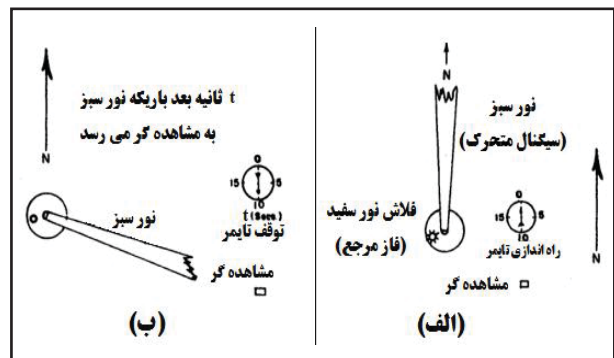
### ۲-۲- سامانه VOR

از سال ۱۹۴۹، VOR به‌عنوان یک سیستم استاندارد جهانی مورد استفاده قرار گرفته است. این سیستم شامل ایستگاه‌های فرستنده در روی زمین و گیرنده‌هایی در هواپیما است. سامانه VOR به‌نحوی بنا گردیده که با ارسال امواج مغناطیسی در اطراف ایستگاه، کاربر سمت خود را نسبت به ایستگاه می‌یابد.

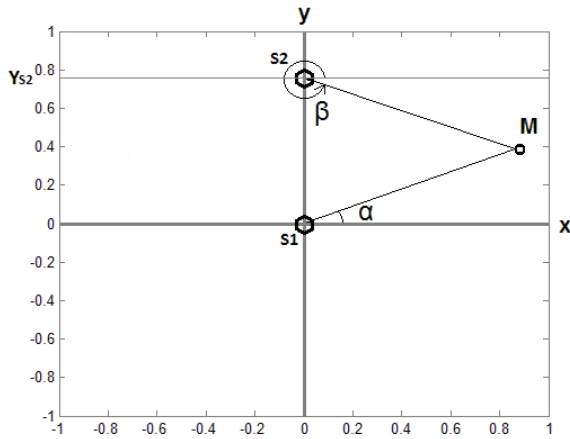
سامانه VOR در باند فرکانسی VHF از فرکانس 108MHz الی 117.95MHz کار می‌کند که فرکانس حامل آن در ایستگاه‌های مختلف متفاوت است. فاصله حامل‌های متفاوت در این باند 50KHz است [۱].

اصول پایه و ابتدایی عملکرد VOR را می‌توان با تشریح یک سیستم نوری مشابه شرح داد. فرض کنید در یک نقطه، دو منبع نور وجود دارد (شکل ۴). یکی از آن‌ها نور سبز رنگ دارد و در حال چرخش است و مشاهده‌کننده فقط زمانی که باریکه نور آن در جهت او قرار می‌گیرد می‌تواند آن را ببیند. منبع نور دیگر، دارای نور سفید رنگ است که از همه جهات قابل مشاهده است. نور سبز رنگ با سرعت زاویه‌ای (ثانیه/درجه)  $\omega$  می‌چرخد و وقتی که در جهت شمال مغناطیسی (قطب شمال) قرار می‌گیرد بلافاصله نور سفید، چشمک می‌زند (شکل ۴- الف) [۱۰].

یک مشاهده‌کننده می‌تواند فاصله زمانی بین چشمک‌زدن نور سفید و سبز بعد از آن را اندازه بگیرد و با دانستن سرعت زاویه‌ای نور چرخان سبز رنگ و موقعیت ایستگاه، زاویه خودش را از منابع نور تعیین کند. برای مثال، اگر مشاهده‌کننده نور سبز رنگ را  $t$  ثانیه بعد از نور سفید رنگ ببیند (شکل ۴- ب)، او در جهت  $\omega t$  درجه از منبع نور و در زاویه  $\omega t$  درجه شعاعی قرار دارد [۱۰].



شکل ۴- تشریح VOR توسط یک سیستم نوری مشابه



شکل ۵- صفحه مختصات شامل دو ایستگاه VOR

$$y_m = x_m \tan(\beta \pm \theta_{es2}) + Y_{s2} \quad (7)$$

با حل دو معادله بالا با دو مجهول  $x_m$  و  $y_m$  می توان مختصات نقطه واحد M را به صورت روابط (۸) و (۹) به دست آورد.

$$x_m = \frac{Y_{s2}}{\tan(\alpha \pm \theta_{es1}) - \tan(\beta \pm \theta_{es2})} \quad (8)$$

$$y_m = \frac{Y_{s2} \tan(\alpha \pm \theta_{es1})}{\tan(\alpha \pm \theta_{es1}) - \tan(\beta \pm \theta_{es2})} \quad (9)$$

که در آن،  $\alpha$  زاویه خط واصل بین ایستگاه S1 و متحرک با محور x و  $\beta$  زاویه خط واصل بین ایستگاه S2 و متحرک با محور x است. در شبیه سازی صورت گرفته، محل ایستگاه S1 در نقطه (۰، ۰) و محل ایستگاه S2 در نقطه (۰، ۵) در نظر گرفته شد. با این فرض که متحرک پس از دریافت پالس مربوط به ایستگاه S1، زاویه  $\alpha$  را برابر ۳۰ درجه و پس از دریافت پالس ایستگاه S2، زاویه  $\beta$  را برابر ۳۲ درجه از جهت مرجع که محور x است، محاسبه کرده است، در نتیجه متحرک می تواند خطوط موقعیت را با رسم خط واصل بین خود و ایستگاه مورد نظر رسم کند. از تلاقی این دو خط، نقطه ای یکتا حاصل می شود که نشانگر موقعیت متحرک است. اگر معادلات (۶) و (۷) را با  $\alpha = 30^\circ$  و  $\beta = 32^\circ$  و با خطای صفر رسم کنیم نتیجه شبیه سازی این سامانه به صورت شکل (۶) به دست می آید. در هر محلی، اگر کاربر بتواند حداقل دو سیگنال VOR دریافت کند، امکان موقعیت یابی به این روش را دارد. اگر بتواند سه سیگنال VOR دریافت کند، از سه طریق می تواند مانند شکل (۷) به این روش موقعیت یابی کند.

فرکانس پایین نیست و به همین دلیل در این محدوده از لورن LFL استفاده شد.

در فواصل کوتاه تنها با استفاده از دو ایستگاه و در فواصل طولانی حداقل به سه ایستگاه زمینی برای موقعیت یابی نیاز است. افزایش تعداد ایستگاه ها به موقعیت یابی دقیق تر منجر می شود.

این سامانه برای موقعیت یابی دو بعدی طراحی شده است ولی می توان با دانستن ارتفاع از طریق ارتفاع سنج هایی مانند RADALT خطای ناشی از ارتفاع را به حداقل رساند.

ایستگاه ها در هر لحظه در مکان مشخصی بر روی سطح کره زمین قرار گرفته اند. به جهت در نظر گرفتن ملاحظات پدافند غیرعامل، این ایستگاه ها متحرک طراحی می شوند و در صورت احساس خطر، قابلیت تغییر مکان آن ها در کمترین زمان ممکن وجود دارد ولی از آنجا که کاربر برای تعیین موقعیت خود نیاز دارد که مکان ایستگاه هایی را که از آن ها استفاده می کند بداند، ایستگاه ها به طور دائم موقعیت خود را ارسال می کنند. اما سؤالی که در اینجا مطرح می شود این است که ایستگاه ها موقعیت خود را چگونه به دست بیاورند؟ برای حل این مسئله می توان از نقشه های دارای موقعیت GIS استفاده نمود و یا قبلاً مکان های متعددی را برای قرارگیری احتمالی ایستگاه ها، توسط GPS و DGPS تعیین و نشانه گذاری کرد. همچنین در صورت وجود تعدادی از این ایستگاه ها در یک محدوده، برای تعیین موقعیت ایستگاه های دیگر می توان از خود سیستم استفاده کرد. در ادامه به بررسی مشخصات هر بخش از ایستگاه ها پرداخته شده است.

### ۳-۱- بخش VOR

برای موقعیت یابی توسط این بخش از ایستگاه ها بدون استفاده از بخش های دیگر، از حداقل دو VOR و در نتیجه دو ایستگاه استفاده می شود. در واقع از تقاطع دو خط مستقیم برای مشخص نمودن یک نقطه یکتا استفاده می گردد. صفحه مختصات دو بعدی را مانند شکل (۵) در نظر می گیریم.

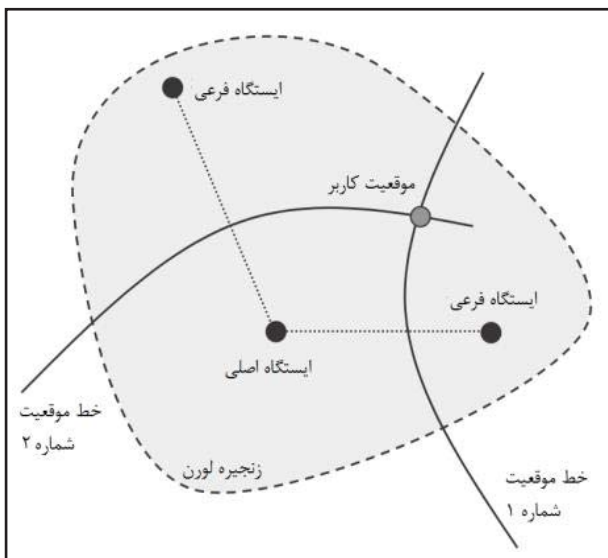
ایستگاه S1 در نقطه (0,0) و ایستگاه S2 در نقطه  $(0, Y_{s2})$  قرار دارد. هر یک از دو ایستگاه از تجهیزات VOR نوری یا رادیویی بهره می برند. جسم متحرک نیز در نقطه  $(x_m, y_m)$  قرار گرفته است. زاویه های  $\alpha$  و  $\beta$  توسط متحرک و پس از دریافت پالس از ایستگاه های VOR اندازه گیری می شوند. جهت مرجع، جهت محور x ها در نظر گرفته می شود. اگر خطای ایستگاه S1 را  $\theta_{es1}$  و خطای ایستگاه S2 بنامیم روابط (۶) و (۷) در این شکل صادق هستند.

$$y_m = x_m \tan(\alpha \pm \theta_{es1}) \quad (6)$$

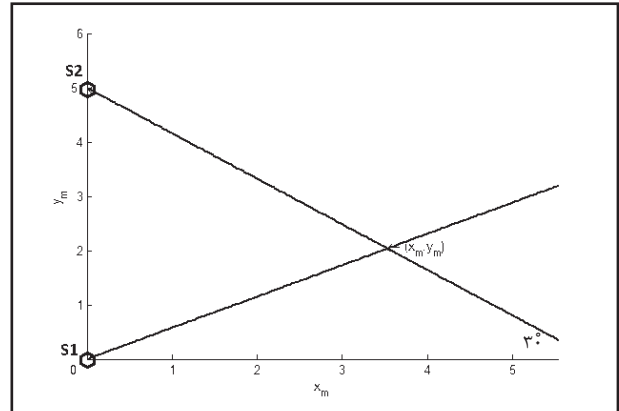
تفاوت این بخش با سامانه لورن C در این است که در این سامانه، هر ایستگاه بر روی یک فرکانس مخصوص به خود و یکتا تنظیم می‌شود و هر ایستگاه، هم سیگنال اصلی و هم سیگنال فرعی ارسال می‌کند. تمامی ایستگاه‌ها پس از دریافت سیگنال اصلی از ایستگاه دیگر، سیگنال فرعی خود را ارسال می‌کنند. مجموعه متشکل از تمامی ایستگاه‌هایی که در محدوده پوشش‌دهی باند LF همدیگر هستند را یک زنجیره LF، و ایستگاه‌هایی که در محدوده پوشش‌دهی باند VHF همدیگر هستند را یک زنجیره VHF می‌نامیم. اطلاعات هر زنجیره در دستگاه گیرنده کاربر قبلاً ذخیره شده و از روی کد زنجیره دریافت شده بازیابی می‌شود.

تفاوت باند LF و VHF در محدوده پوشش‌دهی ایستگاه‌ها است و در باند VHF این محدوده کوچک‌تر و کم‌تر بوده و برای اینکه کاربر بتواند از این بخش ایستگاه‌ها استفاده نماید، باید تعدادی از ایستگاه‌ها در محدوده پوشش‌دهی همدیگر باشند. هر دو بخش لورن LF و لورن VHF، هم سیگنال اصلی خود را ارسال می‌کنند و هم پس از دریافت سیگنال اصلی ایستگاه‌های دیگر، سیگنال فرعی خود را، پس از مدت زمانی ثابتی موسوم به تأخیر کدینگ، ارسال می‌کنند. موقعیت ایستگاه نیز به همراه پالس آن ارسال می‌شود. علاوه بر موقعیت، تنظیمات و اطلاعات مورد لزوم نیز ارسال می‌شود. سیگنال اصلی لورن VHF می‌تواند همان پالس فاز مرجع بخش VOR ایستگاه‌ها باشد.

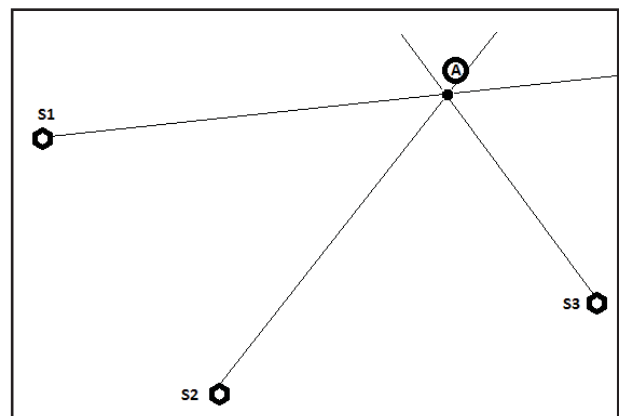
موقعیت‌یابی توسط لورن، مانند شکل (۸)، با قطع دادن دو هذلولی صورت می‌گیرد که این دو هذلولی از سه ایستگاه تشکیل می‌شود.



شکل ۸- تقاطع دو هذلولی و تعیین موقعیت



شکل ۶- شبیه‌سازی سامانه پیشنهادی در متلب با  $\alpha=3^\circ$  و  $\beta=32^\circ$



شکل ۷- موقعیت‌یابی با دریافت سه سیگنال VOR

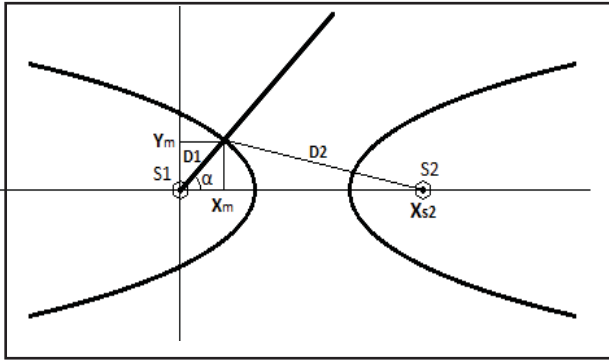
- ۱- از تلاقی خطوط موقعیت ایستگاه‌های S1 و S2
- ۲- از تلاقی خطوط موقعیت ایستگاه‌های S1 و S3
- ۳- از تلاقی خطوط موقعیت ایستگاه‌های S2 و S3

سایر موارد ذکر نشده دقیقاً مشابه سامانه VOR است. محاسبه خط واصل کاربر و ایستگاه توسط کاربر به کمک این بخش صورت می‌گیرد. پس‌یو بودن متحرک از نظر مخابراتی، استفاده از تنها دو ایستگاه برای موقعیت‌یابی و همچنین تعیین موقعیت در کسری از ثانیه از نقاط قوت این بخش به حساب می‌آید.

### ۲-۲- بخش لورن LF و VHF

عملکرد این بخش با اندکی تفاوت، مشابه سامانه معروف لورن C می‌باشد. در ابتدا می‌بایست محدوده‌ای را برای قرارگیری ایستگاه‌ها تعیین نمود. در این محدوده حتماً می‌بایست حداقل سه ایستگاه وجود داشته باشد. افزایش این تعداد، افزایش دقت موقعیت‌یابی را موجب خواهد شد.





شکل ۱۰- موقعیت یابی با استفاده از یک خط موقعیت VOR و یک هذلولی موقعیت لورن

کاربر اختلاف زمان دریافت سیگنال های Hyper را محاسبه کرده و با توجه به ثابت سرعت امواج الکترومغناطیس می تواند ثابت هذلولی ( $X_{TD}$ ) را بصورت رابطه (۱) به دست آورد. با توجه به شکل (۱۰) روابط (۱۰) تا (۱۳) صادق است.

$$D1 = \sqrt{X_m^2 + Y_m^2} \quad (10)$$

$$D2 = \sqrt{(X_{S2} - X_m)^2 + Y_m^2} \quad (11)$$

$$X_{TD} = D2 - D1 \quad (12)$$

$$X_{TD} = \sqrt{(X_{S2} - X_m)^2 + Y_m^2} - \sqrt{X_m^2 + Y_m^2} \quad (13)$$

همچنین با توجه به زاویه  $\alpha$  که توسط بخش VOR به دست آمده است رابطه (۱۴) قابل دست یابی است.

$$\tan \alpha = \frac{Y_m}{X_m} \quad (14)$$

در روابط (۱۳) و (۱۴) فقط مقادیر  $X_m$  و  $Y_m$  مجهول هستند که با حل این دو معادله محاسبه می شوند. کاربر می تواند با دو سیگنال VOR و دو سیگنال Hyper به صورت شکل (۱۱) به سه روش زیر موقعیت یابی نماید:

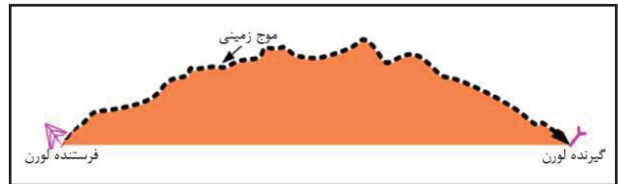
- تقاطع هذلولی و خط موقعیت ایستگاه S1
- تقاطع هذلولی و خط موقعیت ایستگاه S2
- تقاطع خطوط موقعیت ایستگاه های S1 و S2

و به همین ترتیب کاربر می تواند با دریافت سه سیگنال VOR و سه سیگنال Hyper به صورت شکل (۱۰) موقعیت یابی کند.

اگر کاربر این سامانه، فقط سیگنال های لورن LF را دریافت کرده و سیگنال های مربوط به بخش های DVOR و لورن VHF را دریافت نکند، می توان گفت که کاربر در فاصله دوری از ایستگاه ها قرار دارد و فقط لورن LF برای موقعیت یابی استفاده می شود. سیگنال هایی که توسط کاربر برای رسم هذلولی دریافت می شود را سیگنال های Hyper می نامیم.

### ۳-۳- اثر فرکانس در دقت موقعیت یابی

با اینکه نحوه موقعیت یابی با هر دو بخش لورن LF و لورن VHF یکسان است، ولی تفاوت در باند فرکانسی، خصوصیات را در هر یک از آن ها ایجاد می کند. از جمله این خصوصیات دقت بالاتر سیستم لورن VHF نسبت به لورن LF است. به علت خط انتشار مستقیم در باند فرکانسی VHF، خطای آن در مقایسه با باند LF، که از نوع موج زمینی بوده و خط انتشار خیزشی دارد کمتر است. عوارض زمین مسافت گذر سیگنال را افزایش می دهند و در نتیجه سیگنال با اندکی تاخیر به کاربر می رسد که ایجاد خطا می کند. در شکل (۹) نحوه انتشار موج زمینی نشان داده شده است. البته به علت اینکه در فرکانس بالا فرستنده و گیرنده باید در دید مستقیم همدیگر باشند، برد پوشش دهی بخش VHF نسبت به LF پایین تر است [۶].



شکل ۹- نحوه انتشار موج زمینی و ایجاد خطا به علت عوارض زمین

### ۳-۴- نحوه موقعیت یابی

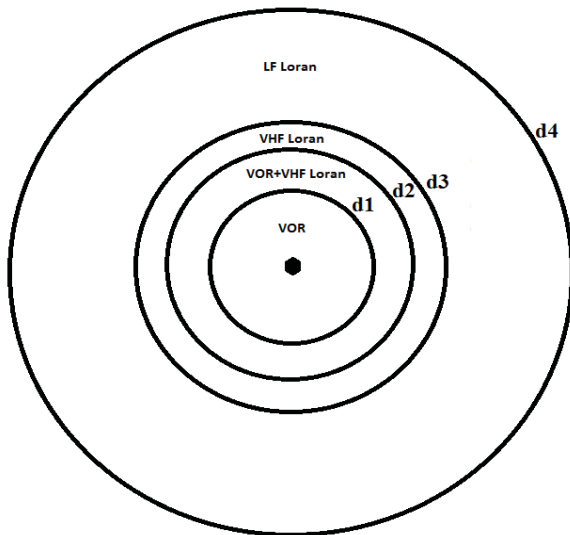
همان طور که ملاحظه شد، هر بخش به طور مجزا می تواند عمل موقعیت یابی را به عهده بگیرد، ولی غیر از دو روش تقاطع خطوط و تقاطع هذلولی ها، از ترکیب دو و یا هر سه بخش نیز روش هایی برای موقعیت یابی ایجاد می شود.

در واقع سه قانون کلی برای تعیین موقعیت کاربر وجود دارد:

- (الف) هر سیگنال VOR یک خط موقعیت رسم می کند.
  - (ب) هر دو سیگنال Hyper، یک هذلولی موقعیت رسم می کند.
  - (ج) از تلاقی خطوط موقعیت با هم، یا با هذلولی ها و یا از تلاقی هذلولی ها با هم می توان موقعیت را تعیین کرد.
- برای مثال، کاربر می تواند با استفاده از یک سیگنال VOR و دو سیگنال Hyper به صورت شکل (۱۰) موقعیت یابی کند.

چرا که دقت بخش‌های مختلف در فواصل دور و نزدیک مختلف است. برای مثال دقت VOR با زاویه بیان می‌شود و این به آن معنی است که دقت آن با افزایش فاصله کاهش می‌یابد. در نتیجه بهتر است که از آن در فواصل نزدیک ایستگاه‌ها استفاده شود. همچنین با توجه به ملاحظات آنکه در بخش اثر فرکانس در دقت موقعیت‌یابی بیان شد، در صورتی که سیگنال‌های باند VHF توسط کاربر دریافت می‌شود، استفاده از آن برای موقعیت‌یابی بهتر از سیگنال‌های باند LF است. در واقع الگوریتم تشخیص ما باید بتواند تشخیص دهد که به کدام داده وزن بیشتری اختصاص دهد.

شکل (۱۲) نشان می‌دهد که کدام بخش از ایستگاه‌ها در محدوده‌های مختلف، اطمینان بیشتری را برای موقعیت‌یابی ایجاد می‌کند.

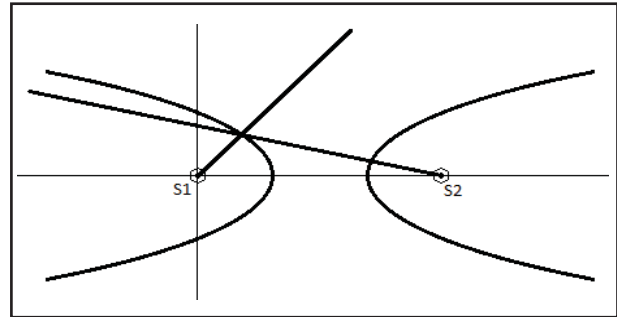


شکل ۱۲- محدوده اطراف یک ایستگاه و بخش دقیق‌تر در آن محدوده

دایره با قطر  $d_1$ ، محدوده‌ای را نشان می‌دهد که موقعیت‌یابی توسط VOR دارای دقت بالاتری نسبت به بخش‌های دیگر است. فاصله بین دایره  $d_1$  و  $d_2$ ، نشان‌دهنده محدوده‌ای است که دقت دو بخش VOR و لورن VHF تقریباً با هم برابر است. فاصله بین دایره  $d_2$  و دایره  $d_3$  محدوده‌ای را نشان می‌دهد که دقت لورن VHF نسبت به بخش‌های دیگر بالاتر است. دایره  $d_4$  محدوده پوشش‌دهی سیگنال‌های لورن LF را نشان می‌دهد که در این محدوده سیگنال‌های VHF دریافت نمی‌شود.

با توجه به این مشخصات می‌توان برای افزایش دقت موقعیت‌یابی، در هر محدوده به سیگنال‌های با دقت بالاتر اولویت و وزن بیشتری اختصاص داد.

راهکار دیگری که برای افزایش دقت در نظر گرفته شده است، استفاده از VOR داپلر (DVOR) به جای VOR استاندارد است که



شکل ۱۱- موقعیت‌یابی با استفاده از دو خط و یک هذلولی

با توجه به قانون کلی ذکر شده، حالت‌های متعدد دیگری نیز برای موقعیت‌یابی متصور است. در صورتی که کاربر تمامی این سیگنال‌ها را دریافت می‌کند، در فاصله نزدیک‌تری از ایستگاه‌ها است. در صورتی که فقط از یکی از ایستگاه‌ها سیگنال‌های باند VHF را دریافت می‌کند، باز هم سیگنال‌های لورن LF چاره‌ساز است. در صورتی که حداقل از دو ایستگاه، سیگنال‌های VHF دریافت می‌شود، می‌توان گفت که موقعیت‌یابی در این نقطه توسط VOR و لورن VHF به علت خطای کمتر اولویت دارد. در این حالت توسط این دو بخش می‌توان موقعیت‌یابی اولیه برای تشخیص محدوده موقعیت انجام داد.

### ۳-۵- خطای موقعیت‌یابی

در این سامانه سه عامل عمده برای ایجاد خطا وجود دارد که شامل خطای ایستگاه زمینی، خطای تأثیرات سایت و خطای تجهیزات دریافت کننده سیگنال می‌باشند.

- خطای مربوط به ایستگاه زمینی از کیفیت تجهیزات و طراحی به کاررفته در آنتن‌ها و منابع تغذیه ناشی می‌شود.
- خطای تأثیرات سایت، به محل قرارگیری ایستگاه و توپوگرافی و ویژگی‌های مکان‌های نزدیک ایستگاه باز می‌گردد. پستی و بلندی‌ها و موانع فیزیکی و سیگنال‌های منعکس شده از زمین، عامل اصلی ایجاد این خطا هستند.
- خطای تجهیزات دریافت کننده نیز از طراحی و کیفیت تجهیزات نصب شده بر روی متحرک ناشی می‌شود.
- در مورد باند LF و مسافت‌های طولانی، سرعت واقعی انتشار امواج الکترومغناطیس بر روی زمین از سرعت آن بر روی سطوح مسطح مانند دریاها و همچنین از داخل جو کمتر است.

### ۴- راهکارهای افزایش دقت موقعیت‌یابی

اطمینان بیشتر به برخی از بخش‌های ایستگاه‌ها با توجه به مکان تقریبی کاربر، افزایش دقت موقعیت‌یابی را به همراه خواهد داشت.



می‌دهد. این روند تخمین به صورت بازگشتی است. یعنی نیازی نیست که برای تخمین، همه اطلاعات قبلی نگهداری شوند، بلکه اطلاعات به دست آمده در هر مرحله با اطلاعات مرحله قبلی ترکیب می‌شوند و تخمین حالت به دست می‌آید [۲].

در نوع ساده شده‌ای از فیلتر کالمن به نام فیلتر آلفا-بتا فرض بر این است که سیستم را می‌توان با یک مدل که دو متغیر داخلی دارد تخمین زد؛ به صورتی که متغیر اول با یکپارچه‌سازی مقادیر متغیر دوم در طول زمان به دست می‌آید. مقدار خروجی سیستم با مشاهدات در متغیر اول، به علاوه اختلالات برابر است [۱۱].

این دو متغیر می‌توانند موقعیت  $x$  و سرعت  $v$  باشند. فیلتر آلفا-بتا یک سیستم را با استفاده از دو خصوصیت موقعیت و سرعت آن مدل می‌کند.

$$x_k = x_{k-1} + \Delta T v_{k-1} \quad (15)$$

اگر سرعت را ثابت فرض کنیم، مقدار مورد نظر در نمونه برداری بعدی با مقدار فعلی برابر است.

$$v_k \cong v_{k-1} \quad (16)$$

خروجی اندازه‌گیری شده به علت وجود نویز و اثرات دینامیکی، تا حدودی با مقدار پیش‌بینی شده متفاوت است. این خطا را  $r$  می‌نامیم.

$$r_k = y_k - x_k \quad (17)$$

در واقع از آلفا برابر خطای  $r$  برای تصحیح موقعیت و از بتا برابر خطای  $r$  برای تصحیح سرعت استفاده می‌شود.

$$\hat{x}_k = x_k + (\alpha)r_k \quad (18)$$

$$\hat{v}_k = v_k + \left(\frac{\beta}{\Delta T}\right)r_k \quad (19)$$

برای همگرایی و پایداری، ضرایب آلفا و بتا باید مثبت و کوچکتر از یک باشد.

$$0 \leq \alpha \leq 1 \text{ و } 0 \leq \beta \leq 1 \quad (20)$$

هر چه مقدار آلفا و بتا بزرگ‌تر باشد موجب می‌شود که پاسخ سریع‌تر به حالت پایدار و نهایی برسد در صورتی که مقادیر کوچک‌تر آن‌ها عملکرد سیستم را در حذف نویز بهبود می‌بخشد.

موجب کاهش خطا از پنج درجه به یک درجه می‌شود و در آن از اثر داپلر برای کاهش خطای ناشی از چندگانگی مسیر موج استفاده می‌شود [۱].

#### ۴-۱- تلفیق داده‌های به دست آمده

با توجه به مطالب ذکر شده، برای دسترسی به اطلاعات دقیق در موقعیت یابی، روش‌های ترکیب اطلاعات منابع مختلف به منظور رسیدن به اطلاعات دقیق‌تر، جایگاه ویژه‌ای پیدا می‌کند.

منظور از ترکیب داده یا اطلاعات، ترکیب داده‌های هم‌نوع از منابع مختلف برای دست‌یابی به اطلاعات دقیق‌تر و کامل‌تر است. زیرا در اکثر موارد داده‌هایی که از منابع متعدد در مورد یک موضوع خاص در اختیار ما قرار می‌گیرند ناقص، نامعین و گاهی همراه با خطا است. مزایای استفاده از منابع متعدد اطلاعات به‌طور خلاصه قابلیت اطمینان بالاتر و نتایج دقیق‌تری را به دنبال خواهد داشت. در ضمن این امکان وجود دارد که در صورت خرابی یکی از سیستم‌ها، سایر سیستم‌ها این خلاء را پر کنند.

روش‌های متنوعی برای ترکیب اطلاعات وجود دارد که برحسب اینکه مشخصات ورودی و خروجی فرایند ترکیب چه چیزی باشد متفاوت می‌باشند. از جمله این روش‌ها می‌توان روش‌های پردازش سیگنال روش‌های شبکه‌های عصبی و منطق فازی و روش‌های تخمین بی‌زن و فیلتر کالمن را نام برد. در این مقاله از روش فیلتر کالمن که یکی از بارزترین روش‌های ترکیب اطلاعات می‌باشد استفاده شده است.

از زمانیکه فیلتر کالمن اولین بار توسط آقای کالمن در سال ۱۹۶۰ مطرح شد، این فیلتر پر استفاده‌ترین تخمین‌گر حالت برای سیستم‌های خطی و غیر خطی بوده است. فیلتر کالمن یک رؤیت‌گر بهینه است که می‌تواند در حل مسائلی مثل تخمین بهینه، پیش‌بینی، فیلتر کردن نویز، و کنترل بهینه اتفاقی به‌کار رود. روش فیلتر کالمن اجازه می‌دهد که چندین اندازه‌گیری به‌طور بهینه در یک تخمین حالت با هم ترکیب شوند. اگر فرایند به‌هنگام‌سازی به صورت ترکیب خطی از تخمین قبلی و اندازه‌گیری‌های جدید صورت گیرد، در این صورت این تخمین‌گر، فیلتر خطی بازگشتی نامیده می‌شود. برای سیستم‌های غیر خطی یا سیستم‌هایی با نویز غیر گاوسی، فیلتر کالمن دیگر بهینه نخواهد بود و باید فیلترهای غیر خطی دیگری نظیر فیلتر کالمن توسعه‌یافته<sup>۲</sup> مورد استفاده قرار گیرند. فیلتر کالمن یک تخمین‌گر بهینه است. این فیلتر با به‌کارگیری تمام اطلاعات به دست آمده از دینامیک سیستم، توصیفات آماری نویز، عدم قطعیت در مدل و اطلاعات دیگر را به کار می‌گیرد و با حداقل کردن میانگین مربعات خطا<sup>۳</sup>، بهترین تخمین را از حالت به دست

1- Multi fading path  
2- Extended kalman Filter  
3- Mean Squared Error

## ۵- نتیجه گیری

برای پیشنهاد یک سامانه موقعیت‌یابی جدید، بر روی انواع سامانه‌های موقعیت‌یابی زمین‌پایه ساخته شده در سراسر جهان - چه آن‌هایی که هم اکنون عملیاتی هستند و چه آن‌هایی که قبلاً مورد استفاده قرار می‌گرفتند - مطالعه صورت گرفت. هدف در این تحقیق، طراحی یک سیستم موقعیت‌یابی بدون وابستگی به ماهواره و توسط ایستگاه‌های زمینی بوده است که از کمترین تعداد ایستگاه برای موقعیت‌یابی استفاده کند و در حداقل زمان، موقعیت یک متحرک را آشکار سازد. این سامانه باید از نظر دقت اندازه‌گیری قابل استفاده بوده و متحرک در آن کاملاً از نظر مخابراتی پسیو باشد و در نتیجه، امکان استفاده از آن در موارد نظامی وجود داشته باشد. طراحی کلی یک سامانه موقعیت‌یابی با کاربر پسیو، سرعت مناسب موقعیت‌یابی، فضای زیر پوشش کافی و دقت مناسب در فواصل مختلف از اهداف این تحقیق در نظر گرفته شده بود.

در این سیستم جدید، با تکنیک‌هایی تلاش شد تا ضعف‌های ذاتی سامانه لورن با استفاده از سامانه‌های ناوبری دیگر، برطرف شود. می‌توان گفت که تغییرات زیر در این سامانه در جهت بهبود عملکرد صورت گرفت:

۱. افزودن بخش VOR به این سامانه که دو بهبود را در پی داشت.
۲. پوشش محدوده گسترش خط اتصال در دو طرف نزدیک ایستگاه
۳. افزایش دقت در نزدیکی ایستگاه‌ها
۴. افزودن بخش لورن VHF که افزایش دقت را به علت حذف عامل توپوگرافی سطح موجب شد.
۵. تغییر سیگنال ارسالی ایستگاه‌ها از پالس لورن به یک رشته اطلاعات و در نتیجه نقش همزمان ایستگاه‌های اولیه و ثانویه برای هر ایستگاه.

همچنین با ترکیب دو سامانه ناوبری VOR، یک سامانه موقعیت‌یابی جدید معرفی شد. ملاحظه شد که وجود سه سامانه لورن LF، لورن VHF و VOR در کنار هم روش‌های جدیدی نیز برای موقعیت‌یابی ایجاد کرد که تقاطع خطوط موقعیت VOR با هذلولی‌های موقعیت لورن LF و لورن VHF از آن جمله بود.

می‌توان این سامانه را به‌طور متحرک طراحی نمود به‌گونه‌ای که در مواقع بحرانی، در جهت کاهش آسیب، امکان تغییر مکان سریع آن وجود داشته باشد. تجهیز این ایستگاه‌ها به سیستم‌های ضد جنگ الکترونیک، کمک شایانی به کاربردی شدن این سامانه خواهد کرد. در پایان به تلفیق اطلاعات به‌دست آمده توسط این سامانه، به‌وسیله نوع ساده شده فیلتر کالمن به نام فیلتر آلفا- بتا پرداخته شد.

## مراجع

۱. اسداللهی، احسان؛ خلیل‌زاد، محمدرضا؛ سیستم‌های رادیویی در ناوبری هوایی، انتشارات فرات، چاپ اول، صفحات ۱۹-۴۰، زمستان (۱۳۸۱).
۲. مشیری، بهزاد؛ نیکروش، سید کمال‌الدین؛ دهقانی تفتی، عبدالرضا؛ روش‌های ترکیب اطلاعات بر اساس فیلتر کالمن، دوازدهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، (۱۳۸۳).
3. [http://www.casa.gov.au/wcmswr/\\_assets/main/pilots/download/vor.pdf](http://www.casa.gov.au/wcmswr/_assets/main/pilots/download/vor.pdf)
4. Groves, P. D., Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, Norwood, MA: Artech House, pp 6-7, (2008).
5. National Imagery and Mapping Agency, "The American Practical Navigator", Pub. No 9, pp.173-180, (1995).
6. Wouter Johan PELGRUM, "New Potential of Low-Frequency Radionavigation in the 21st Century", pp.9-25, (2006).
7. Powell, C., "Hyperbolic Navigation," in Navigation Systems, G. E. Beck, (ed), London, UK: Van Nostrand Reinhold, (1971), pp. 53-117.
8. Proc, J., Hyperbolic Radio Navigation Systems, www.jproc.ca/hyperbolic, (2001-2007).
9. Blanchard, W. F., "Air Navigation Systems Chapter 4. Hyperbolic Airborne Radio Navigation , Aids - A Navigator's View of their History and Development," Journal of Navigation, Vol. 44, No. 3, (1991), pp. 285-315.
10. [http://www.casa.gov.au/wcmswr/\\_assets/main/pilots/download/vor.pdf](http://www.casa.gov.au/wcmswr/_assets/main/pilots/download/vor.pdf)
11. [http://en.wikipedia.org/wiki/Alpha\\_beta\\_filter](http://en.wikipedia.org/wiki/Alpha_beta_filter)

# A General Design for Position Finding System as a Back-up for the Global Positioning System (GPS)

M. Jenabi<sup>1</sup>

S. M. Alavi<sup>2</sup>

R. Haghmaram<sup>3</sup>

## Abstract

Global positioning system (GPS) is one of the targets that could potentially be attacked by electronic warfare systems. Disruption of this system for countries which dependent on it could be devastating. In this regard, a native positioning system for a country can play a significant role in reducing this damage.

Today, despite having several different satellite systems, including GPS ,the use of backup system is a necessity.

In this paper, we describe a system which works with the GPS but independently with a perfect precision. This system carries out positioning and navigation functions.

The purpose of this paper is to review the overall design of a positioning system, with a passive user, rapid positioning, sufficient coverage, and acceptable accuracy for different distances. The system can also be designed transportable so that in crisis times, it is possible to move quickly. Finally, we explain the use of data fusion by Kalman filter for this system.

**Keys Words:** *Radio Navigation, Radio Positioning, VOR, Ground- based Positioning, LORAN*

---

1- MS in Electronics- Imam Hossein Comprehensive University (Pbh)- Writer in charge (Email: me.jenabi@gmail.com)

2- Assistant Professor and Academic Member of the Faculty of ICT - Imam Hossein Comprehensive University (Pbh) (Email: smalavi@yahoo.com)

3- Assistant Professor and Academic Member of the Faculty of ICT - Imam Hossein Comprehensive University (Pbh) (Email: haghmaram@yahoo.com)