ارزیابی روش‌های تخمین تفاضل پوش به سیکل[1] در سامانه‌ی زمین پایه لورن به منظور تعیین موقعیت دقیق و صحیح در شرایط بحران انسان‌ساخت

مهدی مدیری *: دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، Email:mmodiri@ut.ac.ir
رضا عرب‌صاحبی: دانشجوی دکتری نقشه برداری، گروه ژئودزی، دانشکده نقشه‌برداری، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.
هانیه طباطبایی: کارشناسی ارشد نقشه برداری، گروه ژئودزی، دانشکده نقشه‌برداری، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.

تاریخ دریافت: ۹۳/۵/۲۰
تاریخ پذیرش: ۹۵/۵/۱۷

چکیده

امروزه، جی پی اس[2] متداول‌ترین سیستم تعیین موقعیت در جهان محسوب می‌شود، ولی ضعف‌های مختلف این سیستم از قبیل اختلالات اتمسفری طبیعی و مصنوعی، امکان هدف قرار دادن ماهواره‌های جی پی اس در فضا و . . . می‌تواند زیرساخت موقعیت‌یابی جهانی را خدشه‌دار کند. بنابراین سیستم تعیین موقعیت زمین پایه لورن، به‌منزله‌ی سیستم مکمل (در شرایط عادی) یا پشتیبان (در شرایط بحران) مطرح شد. عوامل مختلفی در افزایش دقت این سیستم تأثیرگذار هستند که یکی از مهم‌ترین این عوامل، تفاضل پوش به سیکل است. این عامل مبیّن اختلاف زمانی بین فاز حامل سیگنال تولیدشده‌ی لورن نسبت به مبدأ زمانی سیگنال استاندارد است و به نوعی مشخص می‌کند در چه مکان‌هایی، دامنه‌ی سیگنال برابر صفر خواهد شد. تعیین این عامل دو مزیت خواهد داشت: ۱. مدت زمان دستیابی به موقعیت گیرنده را کاهش می‌دهد. ۲. مقایسه‌ی صفر استاندارد با نقطه‌ی عبور صفر سیگنال دریافتی، به گیرنده در تأیید صحت سیگنال دریافتی کمک می‌کند. آنچه که در شرایط بحران دارای اهمیت ویژه‌ای است، دستیابی به موقعیت با دقت بالا در کوتاه‌ترین زمان ممکن است که تعیین تفاضل پوش به سیکل هم در کاهش زمان و هم افزایش دقت تعیین موقعیت مؤثر است. اگر این پارامتر درست تعیین نشود، موجب ایجاد خطای سیکل شده و باعث می‌شود گیرنده، سیکل را اشتباه انتخاب کند. این خطا ممکن است در طول ردیابی سیگنال ادامه یابد و باعث خطای طول‌یابی در حد چند هزار کیلومتر گردد.

واژه‌های کلیدی: *لورن، تفاضل پوش به سیکل، صفر استاندارد، صحت، خطای سیکل*

Assessment of ECD Estimation methods in Loran Ground-Based System to determine the accurate position in the man-made crises

Mahdi Modiri*[1]1, Reza Arab-Sahebi[2], Hanieh Tabatabaei[3]

Abstract

Today, GPS is as the most popular positioning system throughout the world but the weaknesses of this system such as natural and artificial atmospheric disturbances, being a target possibility of GPS satellites in space and etc., can disrupt infrastructure of global positioning. So Loran ground-based positioning system was introduced as augmentation system (under normal condition) or backup (in crisis). Various factors may affect on the accuracy improvement of the system. One of the most important parameters is envelope-to-cycle difference (ECD). This parameter indicates the time difference between carrier phases of loran related to timing origin of standard signal and determines at what locations; the signal will be zero. This parameter will have two advantages: (1) reduces the time to reach the receiver position, (2) by comparison with the standard zero point and zero crossing signal, will help to the receiver for verifying the received signal. In crisis situation, what particularly important, is achieving high-precision position in the shortest time possible so ECD determination is effective in reducing the time and increasing the accuracy of positioning. If this parameter is not specified correctly, causing the cycle error and cause the receiver to select the wrong cycle. This error may continue during the tracking signal and cause the error of distance-metry is a few thousand kilometers.

Key words: *Loran, Envelope-to-Cycle Difference, standard zero point, accuracy, cycle error*

1 Associate Professor, Malek ashtar University of Technology, Tehran, Iran; Email:mmodiri@ut.ac.ir
2 Ph.D. Student of Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology
3 M.Sc. of Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology

مقدمه

علم تعیین موقعیت و ناوبری نقش مهمی در زندگی بشر ایفا می‌کند. رصد ستارگان، قدیمی‌ترین روش ناوبری است که توسط بشر مورد استفاده قرار گرفته است. در سال‌های میانی قرن گذشته، سیستم رادیویی لورن[۳] توسط ارتش ایالات متحده‌ی امریکا برای ناوبری کشتی‌ها مورد استفاده قرار گرفت [۱]. از سال ۱۹۴۵ تا دهه ۱۹۷۰، سیستم ناوبری برد بلند به وسیله‌ی ایالات متحده‌ی آمریکا و اتحاد جماهیر شوروی سابق (سیستم زمین‌پایه‌ای که توسط شوروی راه‌اندازی گردیده بود چایکا[۴] نام داشت) با ترسیم چشم‌انداز استفاده از این سیستم در کاربردهای نظامی، توسعه یافت. در سال ۱۹۷۰ ایالات متحده‌ی امریکا و کانادا رسماً این سیستم را یک سیستم تعیین موقعیت ملی اعلام کردند که این اقدام موجب استفاده از آن در بخش‌های غیرنظامی گردید. بنابراین پیشرفت‌های تجاری چشمگیری در این سیستم پدید آمد و تحولی عظیم در ساخت گیرنده‌های آن صورت گرفت. این پیشرفت تا جایی بود که در سال ۱۹۹۰ تعداد کاربران این سیستم در هوا، دریا و زمین به یک میلیون نفر رسید [۲]. بریتانیا در سال ۱۹۹۰ با گسترش ناحیه‌ی پوشش لورن به اروپای شمال غربی موافقت نمود. ونزوئلا، هند و چین نیز پس از این سال به ناحیه‌ی پوشش این سیستم اضافه شدند. نزدیک‌ترین زنجیره‌ی لورن در همسایگی ایران، زنجیره‌ی عربستان است. سیستم تعیین موقعیت زمین‌پایه‌ی لورن بر اساس اختلاف زمانی پالس‌های دریافتی از فرستنده‌های اصلی و ثانویه که در یک شبکه‌ی چندگرهی قرار دارند، عمل می‌کند. این زنجیره شامل یک ایستگاه اصلی و دو تا پنج ایستگاه ثانویه است که ایستگاه‌های ثانویه با اصلی همزمان هستند. برای مثال یک زنجیره که شامل سه ایستگاه ثانویه (x، y و z) باشد را در نظر بگیرید. ایستگاه ثانویه‌ی x، گروه پالسی خود را چند میکروثانیه پس از ایستگاه اصلی ارسال می‌کند و ایستگاه‌های y و z که سنکرون هستند پس از چند میکروثانیه و پس از ایستگاه ثانویه ارسال سیگنال انجام می‌دهند. گیرنده‌ی لورن، اختلاف زمانی گروه پالسی ورودی بین ایستگاه اصلی و ثانویه را اندازه‌گیری می‌کند. موقعیت فرستنده‌ها، میزان تأخیر ارسال سیگنال و سرعت انتشار پالس لورن می‌تواند به صورت دقیق تخمین زده شود. تقاطع دو هذلولی موقعیت کاربر را تعیین خواهد نمود.

نکته‌ای که در استفاده از سیستم‌های تعیین موقعیت ماهواره‌ای فراموش می‌گردد مبنای نظامی این‌گونه سیستم‌هاست. به‌علاوه استراتژیک بودن مقوله‌ی موقعیت ایجاب می‌کند که ایجادکنندگان این‌گونه سیستم‌ها دسترسی انتخابی و انحصاری سیستم در مواقع اضطراری و جنگ را برای خود محفوظ دارند. بی‌شک با توجه به هزینه‌ی گزاف ایجاد و نگهداری این‌گونه سیستم‌ها نمی‌توان بر این سیاست خرده گرفت، بلکه لازم است برای کاربردها و اهداف ملی، سیستم تعیین موقعیت جایگزین و مکمل پیش‌بینی نمود تا در مواقع اضطراری با اتکا به آن بتوان همچنان به تعیین موقعیت پرداخت. با توجه به هزینه‌ی کم آن نسبت به سیستم تعیین موقعیت ماهواره‌ای، امکان وجود تکنولوژی این سیستم در کشور و نیز وجود نمونه‌های تجاری آن در دنیا، پیاده‌سازی این سیستم در کشور را امکان‌پذیر نموده و می‌تواند به‌عنوان سیستم تعیین موقعیت ملی قلمداد شود [۳].

اندازه‌گیری تفاضل پوش به سیکل در گیرنده‌های لورن فاکتور مهمی است، زیرا عدم تعیین درست آن موجب ایجاد خطای دوره‌ای می‌شود. نویز حرارتی و اتمسفری در اندازه‌گیری پوش گیرنده‌ی لورن اختلال ایجاد می‌کند و ممکن است باعث شود گیرنده در هنگام جمع‌آوری سیگنال، سیکل را اشتباه انتخاب کند. خطای سیکل ممکن است در طول ردیابی سیگنال ادامه پیدا کند و باعث خطای طول‌یابی تا سه هزار کیلومتر گردد [۴]. به بیان دیگر، دلیل اولیه‌ی خطای دوره‌ای، تفاضل پوش به سیکل است که همان اختلاف بین زمان رسیدن فاز و پوش است. این اختلاف به این دلیل به وجود می‌آید که گیرنده‌ی لورن ابتدا زمان رسیدن پوش را تعیین می‌کند و گیرنده از این پوش نزدیک‌ترین نقطه‌ی صفر را تعیین خواهد کرد که از این نقطه در تعیین زمان رسیدن فاز در کاربردهای ناوبری استفاده خواهد شد. اگر تمام خطای تفاضل پوش به سیکل برابر نیم‌سیکل (پنج میکروثانیه) باشد، خطای سیکل برابر ده میکروثانیه خواهد شد. در شرایط بحران (به‌خصوص در شرایط جنگ) داشتن یک سیستم تعیین موقعیت دقیق از ضروریات است. از طرفی دستیابی به یک سیستم تعیین موقعیت دقیق، مستلزم مدل‌سازی بسیاری از تصحیحات است که برخی از آن‌ها زاییده‌ی شرایط محیطی و برخی نیز به تجهیزات تشکیل‌دهنده‌ی سیستم (اعم از گیرنده و فرستنده) برمی‌گردد. در این تحقیق، ابتدا به تشریح مشخصات سیگنال لورن می‌پردازیم و روش‌های مختلف تعیین تفاضل پوش به سیکل اعم از روش گارد ساحلی امریکا، استفاده از الگوریتم اچ سی پی آر[۵]، الگوریتم ردیابی نقطه‌ی عبور از صفر استاندارد و روش تأخیر گروهی برای تعیین تفاضل پوش به سیکل پالس دریافتی را مورد ارزیابی قرار می‌دهیم. در واقع، در این الگوریتم‌ها به دنبال این هستیم که بتوان پارامتر تفاضل پوش به سیکل را در مدت زمان کمتر و به‌طور صحیح برآورد نمود تا در شرایط بحران علاوه بر دستیابی به تعیین موقعیت، در جهت تسریع در دقیق بودن مختصات کاربر نیز اقدام شود و روش پیشنهادی مورد نظر نگارندگان را به‌منزله‌ی روش کارا در تعیین پارامتر پوش به سیکل، خواهیم گفت.

در شرایط بحران انسان‌ساخت که جنگ یکی از آن‌هاست، تمرکز نیروها بر استفاده از یک سیستم تعیین موقعیت کاراست که در شرایط بحران به نیروهای خودی در جهت تعیین دقیق مواضع دشمن کمک کند. کشورهای دارای تکنولوژی سیستم تعیین موقعیت فضاپایه، در گذشته به گونه‌ای عمل کردند که نشان می‌دهد این سیستم در اختیار کشور پرتاب‌کننده‌ی ماهواره در مدار ژئو است و این دغدغه همواره وجود دارد که این سیستم‌های تعیین موقعیت ممکن است در شرایط بحران برای سایر کشورها کارایی لازم را نداشته باشد. حتی کشور امریکا نیز علیرغم استفاده‌های متعدد از سامانه‌ی تعیین موقعیت جی پی اس، در حال حاضر از سیستم زمین پایه لورن استفاده می‌کند و آن را به ای- لورن نیز

ارتقا داده است. بنابراین، در اختیار داشتن یک سیستم تعیین موقعیت مطلوب و یک سیستم تعیین موقعیت مکمل یا جایگزین، همواره از اولویت در مجموعه‌های نظامی برخوردار بوده است. اما سیستم‌های تعیین موقعیت زمین‌پایه نظیر لورن، تابع شرایطی هستند که باید در قضیه‌ی آرایش هندسی ایستگاه‌ها، محاسبه‌ی زمان، تصحیحات اتمسفری و مدل‌سازی آن‌ها، تفاضل پوش به سیکل و ... مطالعات متعددی صورت گیرد. تعیین دقیق پارامتر تفاضل پوش به سیکل، هم در کاهش زمان و هم افزایش دقت تعیین موقعیت مؤثر است. تعیین درست این عامل موجب می‌شود فاصله‌ی به دست آمده از گیرنده تا فرستنده با دقت مطلوب‌تری تخمین زده شود.

پیشینه‌ی تحقیق

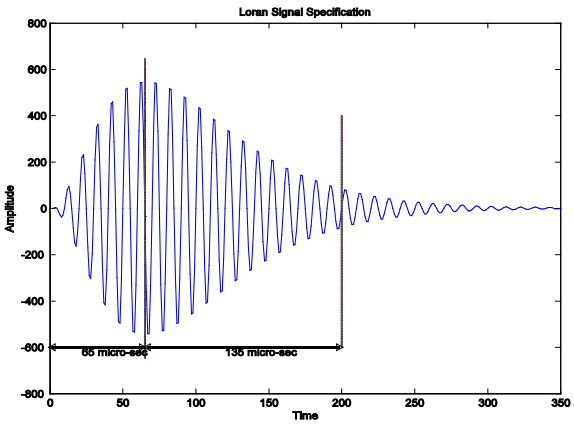
گیرنده‌ی لورن از اندازه‌گیری زمان رسیدن سیگنال، دو بار فاصله را تخمین می‌زند و سومین لحظه‌ی عبور سیگنال از صفر استاندارد را مبنا قرار می‌دهد که در ۳۰ میکروثانیه‌ی اول اتفاق می‌افتد. پترسن[۶]، یکی از روش‌های تعیین صفر استاندارد را نسبت دو پوش اندازه‌گیری در نظر گرفت [۵]. ولی پس از آن روش‌های مختلفی توسط افراد و مؤسسات مختلف ارائه گردیده که این روش‌ها علاوه بر اختلاف در مبانی، مزایا و معایب متفاوتی دارند. چند روش ساده برای محاسبه‌ی تغییرات پوش به سیکل برحسب فاصله ارائه شد. در سال ۱۹۶۱، گارد ساحلی ایالات متحده این مکانیسم را مورد بررسی قرار داد و به طور نظری تخمین زد که تغییرات تفاضل پوش به سیکل باید در حدود ۳ میکروثانیه در هر ۱۰۰۰ مایل دریایی بر روی آب‌های دریا باشد [۶]. با آنالیز همان داده‌ها، دین[۷] نشان داد که در مناطق کوهستانی مقدار تغییرات تفاضل پوش به سیکل ممکن است به ۴ میکروثانیه در فواصل نسبتاً کوتاه برسد [۷]. شرمن[۸] تغییرات تفاضل پوش به سیکل را برحسب فاصله، بر آب‌های دریا و خشکی با مقادیر متفاوت ضریب هدایت زمین مورد بررسی قرار داد [۸]. نتیجه‌ی این بررسی منحنی شرمن بود که این منحنی در مدل لورن ایجاد شده توسط فارن‌ورس[۹] در اوایل ۱۹۹۰ استفاده شد [۹]. او و لاست[۱۰] از این منحنی برای مدل‌سازی تغییرات تفاضل پوش به سیکل در شمال غربی اروپا استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که حتی در زمین‌های دارای ضریب هدایت پایین از قبیل کوهستان‌ها، تغییرات تفاضل پوش به سیکل در حدود ۵ میکروثانیه باقی می‌ماند. در سال ۱۹۹۲، پترسن و دیوالت[۱۱] داده‌های گردآوری شده از پروازهای آزمایشی انجام شده توسط بندیکس-کینگ[۱۲] را تجزیه و تحلیل کردند [۱۰]. منحنی آن‌ها ترسیم و با منحنی شرمن مقایسه شد. میزان تغییرات تفاضل پوش به سیکل برحسب فاصله که آن‌ها به دست آورده بودند هم در آب‌ها و هم در اغلب خشکی‌ها به‌جز مناطق با حداقل ضریب هدایت، کمتر از نتایج شرمن بود. آن‌ها دلیل این اختلاف در منحنی‌هایشان در زمین‌های با ضریب هدایت بین ۳-۱۰ تا ۲-۱۰ را به کمبود داده نسبت دادند. اختلاف نتایج شرمن و پترسن ممکن است تا حدودی به این دلیل باشد که هر دو، تغییرات تفاضل پوش به سیکل را در دو نوع زمین متفاوت با ضریب هدایت متفاوت بررسی کرده‌اند. نتایج هر دو نشان‌دهنده‌ی این مطلب است که میرایی سیگنال و تأخیر فاز به طور یکنواخت تغییر نمی‌کند. وجود کوهستان‌ها در مسیر انتشار سیگنال‌ها موضوع را پیچیده‌تر می‌کند که این مسئله در این دو روش اخیر نادیده گرفته شده است. بنابراین روش متفاوتی برای تجزیه و تحلیل تغییرات تفاضل پوش به سیکل مورد نیاز است. در طی چندین سال، محققان مدل‌هایی برای پیش‌بینی تغییرات دوام و پایداری سیگنال لورن (مدل C) و عامل ثانویه‌ی اضافی[۱۳] در زمین‌های مختلف ارائه داده‌اند [۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵]. ابتدا منحنی‌های منتشر شده توسط کمیته‌ی ملی استانداردهای ایالات متحده که بین میرایی سیگنال و سرعت فاز فاکتور ثانویه با فاصله ارتباط برقرار می‌کند، استفاده شد [۱۶]. برای مسیرهایی که دارای بخش‌هایی با ضریب هدایت متفاوت هستند، میرایی کلی با استفاده از روش میلینگتون[۱۴] [۱۷] و تأخیر فاز با روش میلینگتون ـ پرسی[۱۵] [۱۸] تخمین زده شد. نرم‌افزار تهیه شده، از نقشه‌ی مقادیر ضریب هدایت زمین، که به‌منزله‌ی پایگاه داده بر روی کامپیوتر موجود است، استفاده می‌کند. سپس این مقادیر میرایی برای محاسبه‌ی دوام و استحکام زمینی و مقادیر تأخیر فاز برای محاسبه‌ی فاکتور ثانویه‌ی اضافی مورد استفاده قرار گرفتند. در این روش‌ها زمین صاف فرض شد. بعدها این امکان فراهم شد که اثرات کوهستان‌ها در محاسبات اعمال شود. به همین منظور روش مونتیس[۱۶] به‌کار برده شد [۱۹]. مونتیس معادلات انتشار مطرح شده توسط جولر[۱۷] و بری[۱۸] را حل می‌کند [۲۰]. این مدل‌های محاسباتی، دوام سیگنال و تغییرات فاکتور ثانویه‌ی اضافی و تفاضل پوش به سیکل را با استفاده از پایگاه داده‌های ضریب هدایت و ارتفاع زمین تعیین می‌کنند. این روش هنوز توسط نیروی هوایی فدرال امریکا استفاده می‌شود. این مدل‌ها برای محاسبه‌ی تفاضل پوش به سیکل مورد استفاده واقع شدند؛ ابتدا با استفاده از مدل مونتیس اثرات میرایی و تأخیر بر روی مؤلفه‌های فرکانسی سیگنال لورن در بازه‌ی فرکانسی ۱۱۰-۹۰ هرتز تخمین زده شد و سپس شکل پالس به دست آمد. در ادامه چگونگی پیش‌بینی شکل پالس‌های دریافتی و نحوه‌ی تبدیل آن به مقادیر تفاضل پوش به سیکل مطرح می‌شود.

سیگنال ارسالی

شکل موج سیگنال مورد استفاده در سیستم تعیین موقعیت لورن به صورت یک سیگنال با فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز است که دارای پوش خاصی است. در تصویر۱ ملاحظه می‌گردد که گسترش زمانی هر پالس لورن در حدود ۲۰۰ است. این پالس را می‌توان به دو بخش عمده تقسیم کرد:

الف. لبه‌ی پیشرو پالس[۱۹]: به بخشی از سیگنال که در محدوده‌ی زمانی صفر تا ماکزیمم مقدار سیگنال قرار دارد (۶۵ میکروثانیه اول)، لبه‌ی پیشرو پالس گفته می‌شود.

ب. لبه‌ی پسرو پالس[۲۰]: به بخشی از سیگنال که در محدوده‌ی زمانی ۶۵ میکرو ثانیه‌ی اول تا زمان اتمام پالس قرار دارد (حدوداً ۱۳۵ میکروثانیه بعدی)، لبه‌ی پسرو پالس گفته می‌شود.



تصویر۱: ویژگی سیگنال مورد استفاده در لورن

لبه‌های پیشرو پالس

سیگنالی که توسط فرستنده‌ی لورن ارسال می‌گردد، باید مشخصات استاندارد لبه‌های پیشرو در پالس لورن را تأمین نماید. موج حامل موجود در فرستنده‌ی لورن در فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز تولید می‌شود که از نظر نسبت دامنه به سرعت، به حالتی از پیش تعیین شده افزایش و سپس با سرعتی که به ویژگی‌های آنتن و جریان موجود در آن برمی‌گردد به دامنه‌ی صفر کاهش می‌یابد (تصویر۱). اگر لبه‌های پیشروی موج استاندارد لورن را در مقایسه با شکل موج آنتن واقعی بنامیم، می‌توان معادله‌ی این موج را به صورت زیر نوشت:

رابطه‌ی ۱:
$$i(t) = 0 \qquad t < \tau$$

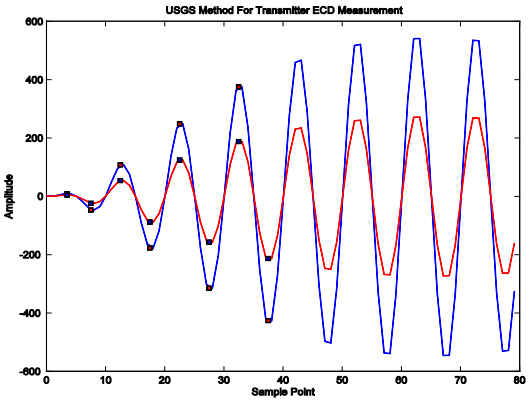
رابطه‌ی ۲:
$$i(t) = A(t-\tau)^2 \, e^{\frac{-2(t-\tau)}{65}} \sin(0.2\pi t + PC)$$

در رابطه‌ی ۲، A ثابت نرمالیزاسیون مربوط به پیک جریان در آنتن بر حسب آمپر، t زمان اندازه‌گیری بر حسب میکروثانیه و τ تفاضل پوش به سیکل بر حسب میکروثانیه است که محدوده‌ی آن $-5\mu sec < \tau < 5\mu sec$ است و PC عامل کدگذاری فاز بر حسب رادیان است که برای کد با فاز مثبت برابر صفر و برای کد با فاز منفی برابر π است.

همان‌طور که در تصویر ۱ ملاحظه می‌گردد، اولین نیم‌سیکل جریان آنتن دارای بازه‌ی زمانی حدود ۵ میکروثانیه و یا کمتر از آن است. زمانی که تفاضل پوش به سیکل مثبت است نیم سیکل اول از τ شروع می‌شود و در زمان ۵ میکروثانیه پایان می‌یابد. بنابراین طول بازه‌ی زمانی اولین نیم‌سیکل برابر $5-\tau$ میکروثانیه است. از نظر تئوری زمانی که تفاضل پوش به سیکل منفی است سیکل اول پالس از قبل از زمان $t=0$ شروع و در زمان $t=\tau$ پایان می‌یابد.

تفاضل پوش به سیکل

وقتی می‌گوییم تفاضل پوش به سیکل برابر صفر است، یعنی صحبت از زمانی است که در یک سیگنال ۱۰۰ کیلوهرتزی لورن، نقطه‌ی ۳۰ میکروثانیه برابر زمان سومین نقطه‌ی عبور سیگنال از صفر مثبت است. به عبارتی دیگر، تفاضل پوش به سیکل صفر، لحظه‌ای است که دامنه در نقطه‌ی نمونه‌برداری معادل با نقطه‌ی عبور از صفر استاندارد برابر با $A/2$ است. تفاوت تفاضل



تصویر ۲: روش گارد ساحلی امریکا در تخمین تفاضل پوش به سیکل ارسالی فرستنده

پوش به سیکل ارسالی و دریافتی موجب می‌شود روش محاسبه‌ی این عامل توسط گیرنده متفاوت با روش تولید آن در فرستنده باشد.

اندازه‌گیری تفاضل پوش به سیکل در فرستنده

یکی از روش‌های استاندارد برای تعیین تفاضل پوش به سیکل در فرستنده، روشی است که گارد ساحلی امریکا (USCG)[۲۱] پیشنهاد داد. در این استاندارد، مقدار تفاضل پوش به سیکل در ورودی آنتن تعریف می‌شود. مطابق تصویر ۲، با تطبیق دامنه و تفاضل پوش به سیکل مربوط به معادله‌ی توصیف‌کننده‌ی پالس لورن، تلاش می‌کنیم بهترین حالتی که این معادله را با شکل پالس اعوجاج یافته تطابق می‌دهد انتخاب کنیم. بنابراین با به دست آوردن معادله‌ی منحنی فیت شده، تفاضل پوش به سیکل استخراج می‌شود.

محاسبه‌ی تفاضل پوش به سیکل در گیرنده

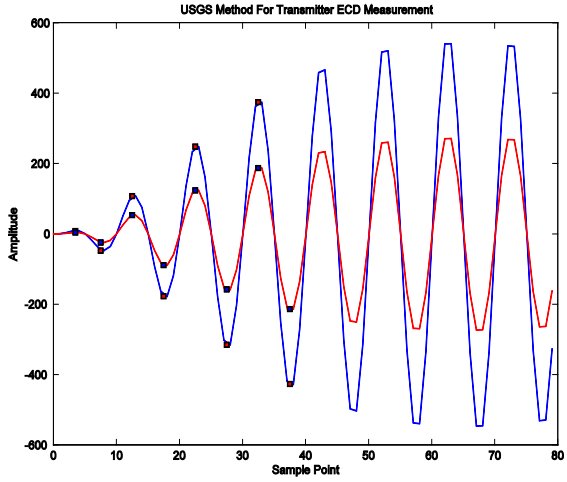
اولین دلیل خطای دوره‌ای در گیرنده‌ی لورن، تفاضل پوش به سیکل است. اگر خطای تفاضل پوش به سیکل به اندازه‌ی ۵ میکروثانیه باشد، خطای دوره‌ای ۱۰ میکروثانیه خواهد بود. دلایل به وجود آمدن خطای تفاضل پوش به سیکل عبارتند از: ۱. خطاهای تفاضل پوش به سیکل فرستنده؛ ۲. خطاهای موجود در پیش‌بینی تغییرات تفاضل پوش به سیکل، وقتی سیگنال از فرستنده به سمت گیرنده ارسال می‌شود؛ ۳. خطاهای موجود در اندازه‌گیری به خاطر وجود نویز؛ ۴. خطاهایی که به علت نبود کالیبراسیون گیرنده به وجود می‌آید [۲۱].

در اینجا روش‌هایی که بر اساس آن تفاضل پوش به سیکل موجود در گیرنده تخمین و محاسبه می‌شود را مورد بررسی قرار می‌دهیم [۲۲].

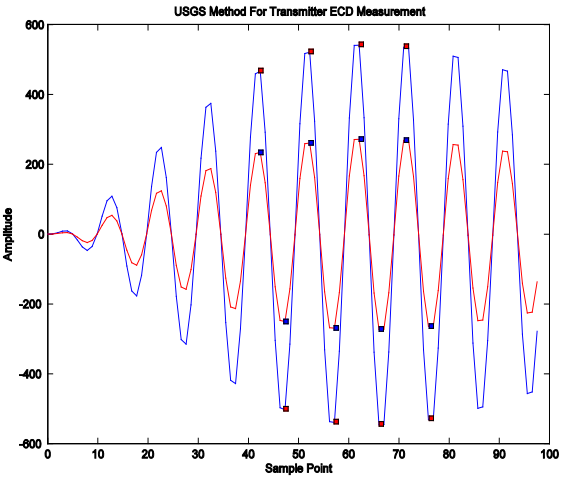
- **روش اول: روش پیشنهادی گارد ساحلی امریکا**

فرایند تخمین تفاضل پوش به سیکل در این روش با استفاده از الگوریتم چهار مرحله‌ای زیر صورت می‌گیرد:

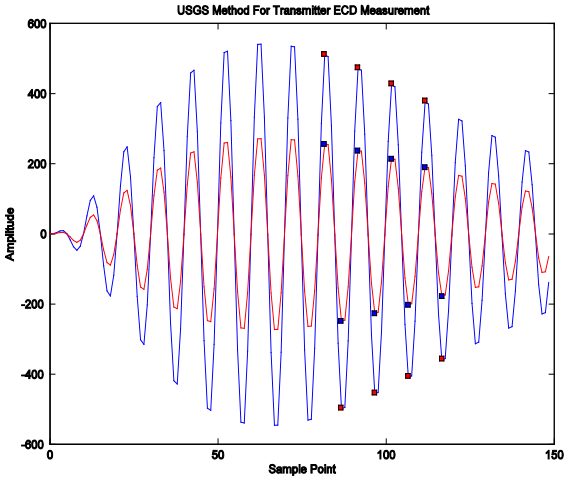
الف. نمونه‌برداری در هشت پیک اول نیم سیکل‌های سیگنال دریافتی به صورت: $I = [a_1, \ldots, a_8]$ که این بردار شامل مقادیر پیک هشت نیم‌سیکل اول مربوط به شکل موج استاندارد لورن نام دارد و $S = [b_1, \ldots, b_8]$ برداری است که شامل مقدار



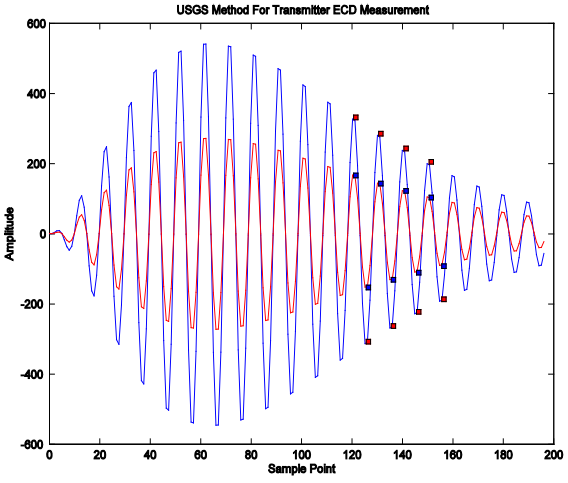
تصویر ۳: نمونه‌برداری در ۸ پیک اول سیگنال مرجع و دریافتی در گیرنده



تصویر ۴: نمونه‌برداری در ۸ پیک دوم سیگنال مرجع و دریافتی در گیرنده



تصویر ۵: نمونه‌برداری در ۸ پیک سوم سیگنال مرجع و دریافتی در گیرنده



تصویر ۶: نمونه‌برداری در ۸پیک چهارم سیگنال مرجع و دریافتی در گیرنده

پیک هشت نیم سیکل اول مربوط به شکل موج دریافتی در گیرنده است.

ب. محاسبه‌ی بردار اختلاف برای j اُمین شکل موج دریافتی به صورت $\Delta_j = I_j - S_j$

ج. محاسبه‌ی کمترین مربعات خطا بر روی تمامی بردارهای اختلاف:

$$MSE_j = \sum_{i=1}^{8}(b_i - a_i)^2 \quad ; \; j = 1,2,\ldots$$

د. محاسبه‌ی مقدار تفاضل پوش به سیکل برابر با:

$$ECD = Min\left(MSE_j\right)$$

جدول ۱: مقایسه‌ی انحراف معیار به دست آمده از روش اول

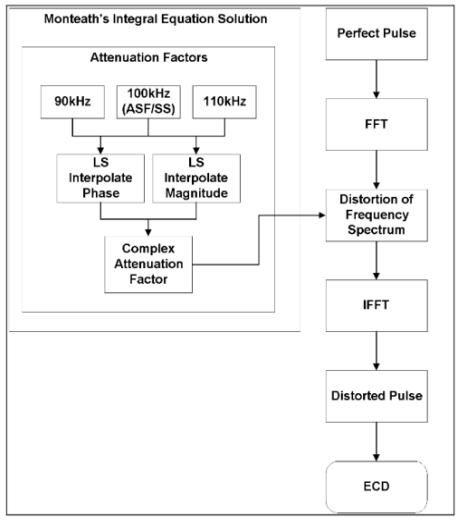
شماره‌ی پیک	مقدار انحراف معیار به دست آمده
اول	۱۳۶.۵۷۸
دوم	۲۷۹.۶۳۵
سوم	۲۳۵.۷۴۳
چهارم	۱۳۸.۹۴۳

هشت پیک اول، دوم، سوم و چهارم سیگنال مرجع و دریافتی گیرنده را در نظر بگیرید (تصاویر ۳ ـ ۶). در هر یک از این حالت‌ها مقدار انحراف معیار را محاسبه و نتیجه‌ی انحراف معیارهای به دست آمده در همه‌ی حالت‌ها را با هم مقایسه و کمترین مقدار به‌منزله‌ی تفاضل پوش به سیکل در نظر گرفته می‌شود.

- **روش دوم: استفاده از الگوریتم اچ سی پی آر**

فلوچارت (روندنما)ی تصویر ۷، روش تعیین تفاضل پوش به سیکل با استفاده از این روش را نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ابتدا یک پالس لورن با تفاضل پوش به سیکل برابر صفر به‌منزله‌ی ورودی، وارد این سیستم می‌شود و با تبدیل فوریه به اجزای فرکانسی شکسته می‌شود. دامنه و فاز حاصل از هر یک از اجزای فرکانسی تولید شده، تحت اثر ضرایب تضعیف مختلط کانال (تابعی از محیط انتشار فرستنده تا گیرنده) قرار می‌گیرد. بر اساس این اجزای فرکانسی تغییر یافته، با استفاده از تبدیل فوریه‌ی معکوس پالس‌های دریافتی در گیرنده تولید و تفاضل پوش به سیکل آن‌ها با استفاده از این الگوریتم محاسبه می‌شود.



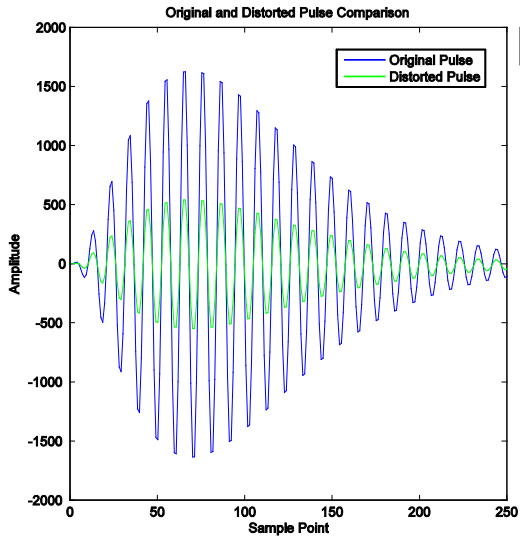
تصویر ۷: الگوریتم محاسبه‌ی تفاضل پوش به سیکل با استفاده از روش اچ سی پی آر[۲۲]

در قسمت چپ تصویر ۷، روش محاسبه‌ی ضرایب پیچیده‌ی میرایی سیگنال در طول مسیر انتشار با استفاده از پایگاه داده‌های ضریب هدایت و ارتفاع زمین مشاهده می‌شود. سپس این ضرایب برای محاسبه‌ی استحکام، تأخیر فاز و فاکتور ثانویه‌ی اضافی‌ها به کار گرفته می‌شود. برای این منظور از روش مونتیس استفاده می‌شود.

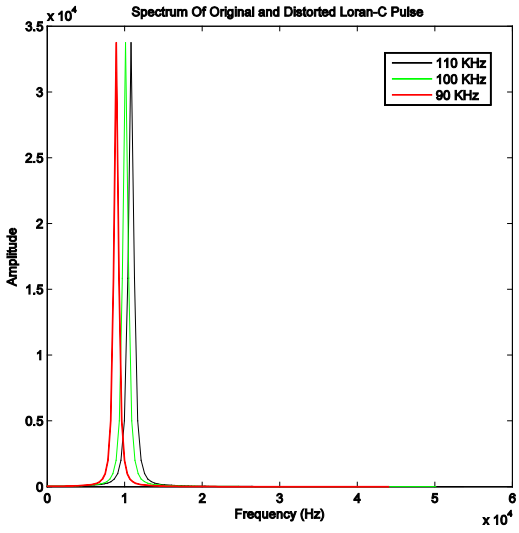
در تصویر ۸، پالس لورن با تفاضل پوش به سیکل برابر صفر پس از اعمال تبدیل فوریه‌ی سریع در فرکانس‌های ۹۰، ۱۰۰ و ۱۱۰ مگاهرتز در فضای فرکانس .دامنه ترسیم شده است.

در اینجا پالس اولیه و اعوجاج یافته (پس از اعمال الگوریتم) با یکدیگر مقایسه می‌شوند. در واقع، به‌منظور استخراج تفاضل پوش به سیکل، در ابتدا پالس انتشار یافته و اعوجاج یافته بر اساس طیف تضعیف شده‌ی دریافتی، بازسازی می‌گردد.

با استفاده از نسبت محاسبه شده در نقطه‌ی ۳۰ میکروثانیه از روی پالس اعوجاج یافته، زمان متناظر با این نسبت بر روی



تصویر ۹: مقایسه‌ی پالس اصلی و اعوجاج یافته‌ی لورن پس از اعمال الگوریتم اچ سی پی آر



تصویر ۸: پالس لورن در فضای فرکانس .دامنه

پالس اصلی محاسبه می‌شود. تفاوت بین این زمان و زمان ۳۰ میکروثانیه مبین تفاضل پوش به سیکل است. برای مثال در زمان برابر ۳۰ میکروثانیه در پالس اعوجاج یافته، عدد به دست آمده برابر با $۸,۳۵۰\times۱۰^{-۱۳}$ است. حال به دنبال زمانی در پالس اصلی هستیم که دارای این نسبت باشد که ۶ میکروثانیه است. بنابراین اختلاف دو زمان به دست آمده ۲۴ میکروثانیه خواهد بود که بیانگر تفاضل پوش به سیکل است.

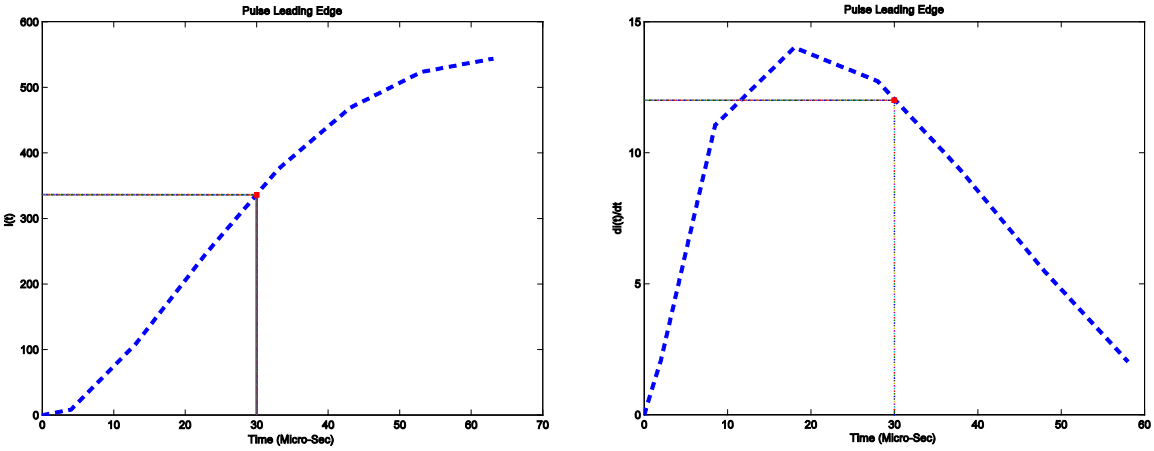
- **روش سوم: استفاده از الگوریتم ردیابی نقطه‌ی عبور از صفر استاندارد**

در این روش، نقطه‌ی عبور سیگنال از صفر استاندارد در یک گیرنده ردیابی و تعیین می‌شود، زیرا این نقطه به‌عنوان ابزاری است که گیرنده با کمک آن سیگنال را ردیابی و پیدا می‌کند. در تصویر ۱۰، شکل پالس لبه‌ی پیشرو و مشتق آن ملاحظه می‌گردد. گیرنده با دریافت سیگنال، ابتدا نقطه‌ی پیک را برای این دو تصویر به‌دست می‌آورد. بنابراین، نقطه‌ی عبور از صفر بین دو نقطه‌ی زمانی متناظر با این دو مقدار ماکزیمم در دو تصویر خواهد بود. حال اگر شکل پوش سیگنال نادرست باشد یا اینکه نسبت به نقطه‌ی عبور از صفر جابه‌جا شده باشد، نقطه‌ی ردیابی برابر با نقطه‌ی عبور از صفر استاندارد نخواهد بود و این اختلاف همان تفاضل پوش به سیکل است.

فرایند متداول به کارگرفته شده در این روش بدین‌گونه است که ابتدا محدوده‌ی وجود نقطه‌ی عبور از صفر با توجه به تصویر ۱۰ مشخص می‌شود و سپس با استفاده از روش ردیابی سیگنال مخابراتی، این نقطه ردیابی خواهد شد.

- **روش چهارم: روش تأخیر گروهی[۲۳] برای تعیین تفاضل پوش به سیکل پالس دریافتی**

یکی از عوامل مؤثر در ایجاد شیفت پوش سیگنالی، تأخیر گروهی است. بنابراین می‌توان تفاضل پوش به سیکل را از روی تأخیر گروهی به دست آورد. چون ۹۹ درصد انرژی طیف پالس لورن در محدوده‌ی فرکانس ۹۰ کیلوهرتز تا ۱۱۰ کیلوهرتز قرار دارد،



تصویر ۱۰: لبه‌ی پیشروی شکل پالس لورن

می‌توان بخش قابل توجهی از تفاضل پوش به سیکل را از رابطه‌ی زیر به دست آورد:

رابطه‌ی ۳: $$ECD = 5 \times \left(\varphi_{110} - \varphi_{90} \right)$$

که φ_{110} و φ_{90} به ترتیب تأخیر فاز برحسب میکروثانیه در فرکانس‌های ۱۱۰ و ۹۰ کیلوهرتز است.

نتیجه‌گیری

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 اجازه‌ی تعیین موقعیت می‌دهد. از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر دقت این سیستم می‌توان به تفاضل پوش به سیکل اشاره نمود. از روشی که برای اندازه‌گیری تفاضل پوش به سیکل در فرستنده به کار می‌رود نمی‌توان در محاسبه یا برآورد تفاضل پوش به سیکل در گیرنده استفاده نمود، زیرا عیب این روش آن است که ابتدای پالس اعوجاج یافته‌ی دریافتی، به دلیل اثرات نامطلوب کانال، به شدت ضعیف بوده و به راحتی نمی‌توان ابتدای پالس را تشخیص داد و در پی آن تفاضل پوش به سیکل سیگنال دریافتی را محاسبه نمود. اغلب گیرنده‌ها نزدیک‌ترین نقطه‌ی عبور از صفر استاندارد را برای تشخیص پالس دریافتی استفاده می‌کنند. بنابراین حداکثر مقدار خطا می‌تواند ۵ میکروثانیه باشد. اگر تفاضل پوش به سیکل به دست آمده بیش از مقدار خطا باشد، موجب می‌شود گیرنده نقطه‌ی عبور از صفر بعدی را به‌عنوان نقطه‌ی عبور از صفر استاندارد در نظر بگیرد که در این‌صورت مختصات به دست آمده از سیستم تعیین موقعیت لورن بر اساس پالس نادرست، دارای خطای زیادی است. بنابراین نیاز است در کنار روش‌های محاسبه، منابع خطا را شناخته و آن را فرموله کنیم. در این تحقیق، روش‌های مختلف تعیین تفاضل پوش به سیکل شامل روش گارد ساحلی امریکا، استفاده از الگوریتم اچ سی پی آر، الگوریتم ردیابی نقطه‌ی عبور از صفر استاندارد و روش تأخیر گروهی برای تعیین تفاضل پوش به سیکل پالس دریافتی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که از لحاظ عملی، فیت نمودن معادله‌ی ریاضی به پالس دریافتی در روش اول و استفاده از الگوریتم اچ سی پی آر در روش دوم کار راحتی نیست، زیرا اگر پیک‌های نیم سیکل اولیه‌ی پالس دارای تضعیف شدید باشد، دست‌یابی به تفاضل پوش به سیکل امکان‌پذیر نخواهد بود. در روش چهارم، چون یک پارامتر مبین تفاضل پوش به سیکل به صورت تخمین اولیه محاسبه می‌شود، ضعف بالا را بهبود می‌بخشد، ولی این روش خود وابستگی تضعیف بین مؤلفه‌های فرکانسی را در نظر نمی‌گیرد، بنابراین روش سوم نسبت به بقیه‌ی روش‌ها دارای کارایی بیشتری است.

پی‌نوشت

1. Envelope-to-Cycle Differences (ECD)
2. Global Positioning System (GPS)
3. Long Range Navigation (Loran)
4. Chayka
5. Half-Cycle Peak Ratio (HCPR)
6. Peterson
7. Dean
8. Sherman
9. Farnworth
10. Last
11. Dewalt
12. Bendix-King
13. Additional Secondary Factor (ASF)
14. Millington
15. Millington-Pressey
16. Monteath
17. Johler
18. Berry
19. Pulse Leading Edge
20. Pulse Trailing Edge
21. US Coast Guard
22. Group Delay

منابع

۱. علمی، امید؛ شریفی، محمد (۱۳۹۰). یک روش ناوبری به کمک مدل رقومی زمین با استفاده از اطلاعات سنجنده‌ی مولتی بیم. نشریه‌ی علمی - پژوهشی علوم و فنون نقشه‌برداری، ۱ (۲)، آبان ۹۰.

2. Federal Radio navigation Plan (1988, des) DOT-TSC-RSPA-88-4, Dept. of transportation, Washington, DC.

۳. آزموده اردلان، علیرضا؛ ادریسیان، محمد (۱۳۸۵)، نیاز به سیستم تعیین موقعیت ملی مکمل سیستم‌های تعیین موقعیت ماهواره‌ای خارجی در

زمان صلح و جایگزین آن‌ها در مواقع بحرانی. نشریه‌ی سپهر، ۱۵ (۵۷)، بهار ۸۵.

4. C. O. Lee Boyce et al (2001). Analysis of Noise and Cycle Selection in Loran Receiver, Stanford University, California 94305.

5. Peterson, Benjamin (2001). Loran-C H-field DDC Receiver, USCG Academy Department of Engineering, New London, CT, Tech, Rep. Version 011221.

6. US Coast Guard, (1961). An Analysis of the envelope-to-cycle discrepancy in the Loran-C system, Rep. CG-163-31, Electronic Eng. Div., Apr.

7. Dean, w. N. (1979). ECD variation in overland propagation, Proc. 8th Ann. Tech. Symp., pp 172-185, Wild Goose Association.

8. Sherman, H. T (1984). Finally –a Practical ECD estimating technique, Proc. 13th Ann. Tech. Symp., pp 172-185, Wild Goose Association.

9. Farnworth, R. G., (1992). Loran-C coverage prediction in western Europe, PhD. Thesis, Univ. of Walesm Jan.

10. Peterson, B. B. & Dewalt, K. M., Analysis of Envelope-to- Cycle Differences (ECD) in far field, Proc. 21th Ann. Tech. Symp., pp 172-185, Wild Goose Association.

11. Last, J.D. & Williams, P., (2002). New sources of ASF data for European Loran users, Ortung and Navigation. Journal of the Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation, 1/2002, pp 119-134.

12. Last, J.D. & Williams, P., (2001). Loran-C for European Non-Precision Approaches, 30thAnnual Convention and Technical Symposium, International Loran Association, Saint Germain-en-Laye, Paris, France, 7-10.

13. Last, J.D. & Williams, P., Peterson, B. and Dykstra, K., (2000). Propagation of Loran-C Signals in Irregular Terrain – Modeling and Measurement Part 1: Modeling, 29thAnnual Convention and Technical Symposium, International Loran Association, Washington DC, Washington USA, 13-15.

14. Last, J.D. & Williams, P., Peterson, B. and Dykstra, K., (2000). Propagation of Loran-C Signals in Irregular Terrain- – Modeling and Measurement Part 2: Modeling, 29thAnnual Convention and Technical Symposium, International Loran Association, Washington DC, Washington USA, 13-15.

15. Last, J.D. & Williams, P., (2000). Mapping the ASFs of the Northwest European Loran-C system. Journal of the Royal Institute of Navigation, 53 (2), 225-235 (Invited).

16. Johler, J. R., Kellar, W.J. and Walters, L.C., (1956). Phase of the Low Radio Frequency Ground Wave, NBS.

17. Millington, G., (1949), Ground Propagation over an Inhomogeneous Smooth Earth, Proc. ptIII, 96, p53.

18. Pressy, B., ashwell, G. & Flower, C., (1953). The Measurement of Velocity of Ground Wave Propagation of Low Frquencies Over a Lands Path, Proc. IEE, 100, ptIII, p73.

19. Monteath, G.D., (1978). Computation of Ground Wave Attenuation Over Irregular and Inhomogeneous Ground at Low and Medium Frequencies, BBC Report 1978/7, British Broadcasting Corporation, Research and Development, Kingswood Warren, Tadworth, Surrey, UK.

20. Johler, J.R., et. Al. (1967). Loran-D Phase Corrections over Inhomogeneous Irregular Terrain, Report ITSA56, Institute for Telecommunication Science and Aeronomy, Boulder, Boulder, Colorado.

21. Sh. Lo, P. Enge, L. Boyce, The Loran Integrity Performance Panel, Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University.

22. P. Williams, D. Last, Modeling Loran-C Envelope – to – Cycle Differences in Mountains Terrain, Univesity of wales, Bangor, UK.