

ارائه یک الگوریتم جدید به منظور حذف تداخل موج پیوسته هم زمان در گیرنده سامانه ناوبری لورن

میثم بیات^۱، محمدحسین مدنی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، ۲- دانشیار، دانشکده مخابرات، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران

(دریافت: ۹۴/۱۰/۰۶، پذیرش: ۹۵/۰۳/۱۷)

چکیده

استفاده از سامانه زمین پایه لورن در ناوبری، به دلیل مصونیت در مقابل جَمینگ و امکان بهبود کارایی آن با استفاده از سخت افزارها و الگوریتم های پردازشی جدید، اخیرا بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. منابع مختلف خطا که از جمله مهمترین آنها تداخل موج پیوسته (CWI) می باشد، باعث خطا در ردیابی فاز سیگنال شده، که این عامل باعث خطا در اندازه گیری زمان ورود و در نهایت کاهش دقت ناوبری می شود. در این مقاله به ارائه یک الگوریتم جدید به منظور حذف تداخل موج پیوسته هم زمان با استفاده از تحلیل ساختار پالس های لورن در حوزه زمان پرداخته شده است. این الگوریتم که از بار محاسباتی بسیار پایینی برخوردار می باشد عملکرد بسیار بهتری نسبت به روش های مرسوم داشته و پیاده سازی آن باعث بهبود کارایی و افزایش دقت ناوبری سامانه می شود. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان می دهد عملکرد الگوریتم پیشنهادی تقریبا مستقل از SIR سیگنال دریافتی بوده و عامل محدود کننده در این الگوریتم تنها SNR سیگنال دریافتی است. الگوریتم پیشنهادی برای اندازه گیری زمان ورود (TOA)، عملا باعث حذف اثر تداخل هم زمان (10^{23} برابر بهبود نسبت به روش های مرسوم میانگین گیری و کدگشایی فاز) می شود. این بهبود چشمگیر در ازای کاهش SIR دریافتی ناشی از تداخل موج پیوسته غیرهم زمان به اندازه حداکثر ۳dB، که می توان آن را با استفاده از یک فیلتر میان گذر به راحتی حذف نمود، حاصل می شود.

واژه های کلیدی: سامانه لورن، تداخل موج پیوسته، ردیابی فاز، SIR، TOA

۱- مقدمه

لورن-C را می توان در محیط های پُر اختلال به کار بُرد. مشکل استخراج اطلاعات مربوط به تعیین موقعیت از اندازه گیری های زمان ورود (TOA) که تحت تأثیر تداخل قرار گرفته اند، در رأس تلاش های طراحان سامانه لورن C و سازندگان گیرنده در سال های اخیر قرار گرفته است. مطالعات مربوط به تداخل، از جمله امواج آسمانی، و تداخل موج پیوسته (CWI) قدمتی به اندازه سامانه لورن دارند [۹-۶].

تحقیقات و پژوهش های پیشین ثابت کرده اند که CWI را می توان برحسب رابطه ی فرکانس آن با سیگنال لورن-C طبقه بندی کرد. [۱۰ و ۱] معیارهای حداقل میزان کارایی (MPS)، سه نوع CWI هم زمان، شبه هم زمان و غیرهم زمان را مشخص می کنند [۱۰]. این نوع از تداخل های موج حامل خطاهایی با ویژگی های مختلف را ایجاد می کنند. CWI هم زمان سبب ایجاد یک جابه جایی ثابت در اندازه گیری TOA می گردد، CWI شبه هم زمان سبب ایجاد یک جابه جایی نوسانی شده و CWI غیر هم زمان نیز سبب یک جابه جایی شبه به نوبت می شود [۱۱]. تحقیقات اخیر ثابت کرده اند که CWI هم زمان و شبه هم زمان

سامانه زمین پایه لورن^۱ یک سامانه ناوبری رادیویی زمینی با برد زیاد است که در فرکانس پایین (۱۰۰ KHz) و با استفاده از ایستگاه های زمینی که به صورت زنجیره ای سازمان دهی شده اند، طراحی شده است. فرستنده های سامانه لورن C دارای قدرت بالایی هستند، بنابراین سیگنال های رسیده به گیرنده دارای توانی چند برابر توان سیگنال دریافتی توسط گیرنده های سامانه های ماهواره ای است. انتشار سیگنال در فرکانس های پایین به خصوص با توان های بالا، نیاز به آنتن های بزرگی دارد. بنابراین جَمینگ روی سیگنال های لورن C در غیر از محدوده های کوچک بسیار مشکل است. استفاده از سامانه زمین پایه لورن در ناوبری، به دلیل مصونیت در مقابل جَمینگ و امکان بهبود کارایی آن با استفاده از سخت افزارها و الگوریتم های پردازشی جدید، اخیرا بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [۵-۱]. مهمترین عامل خطا در سامانه های لورن، تداخل موج پیوسته با امواج زمینی است. گیرنده های

* رایانامه نویسنده مسئول: Mh_madani@aut.ac.ir

بررسی تاثیرات CWI بر روی گیرنده لورن C پرداخته شده و سپس در بخش ۴، یک تحلیل از تأثیرات عملکردهای میانگین گیری و رمزگشایی فاز گیرنده‌ها بر روی CWI صورت گرفته است و یک ارزیابی کمی از کارایی گیرنده در شرایط CWI ارائه شده است [۲۱]. در بخش ۵، یک روش پیشنهادی برای حذف CWI هم‌زمان به منظور بهبود کارایی و افزایش دقت تخمین زمان ورود و در نهایت افزایش دقت ناوبری ارائه گردیده است. در بخش ۶، این الگوریتم برای سیگنال لورن دریافتی که با CWI هم‌زمان آغشته شده است شبیه‌سازی شده و نتیجه آن با الگوریتم‌های موجود مقایسه گردیده است. در پایان، نتیجه‌گیری از تحلیل‌های صورت گرفته انجام شده است.

۲- معرفی سامانه ناوبری زمین پایه لورن

سامانه لورن C یک سامانه رادیوناوبری زمین‌پایه است [۱۸] که در طیف فرکانس رادیویی ۱۱۰-۹۰ KHz عمل می‌کند. این سامانه انتشار امواج زمینی را به عنوان ابزار اصلی ارسال به کار می‌برد و به بازه دید مستقیم (LOS)^۱ برای کاربران محدود نمی‌شود [۲۳]. از مزایای لورن-C می‌توان به استفاده این سامانه از سیگنال‌های ارسالی بسیار قوی که اختلال بر روی آن‌ها دشوار است اشاره کرد. همچنین این سامانه می‌تواند به عنوان یک پشتیبان مستقل سامانه موقعیت‌یاب جهانی عمل کند و از طرفی این سامانه انتشار زمانی با دقت بالا ارائه می‌کند و سیگنال فرکانس پایین ارسال می‌نماید. سیگنال فرکانس پایین این سامانه که به درون مکان‌های مسقف نفوذ می‌کند بسیار بهتر از سامانه موقعیت‌یاب جهانی است [۲۴].

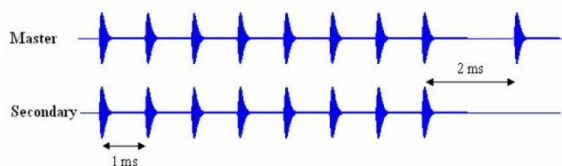
به‌طور خلاصه سامانه لورن-C شامل یک زنجیره متشکل از ۳ فرستنده یا بیشتر است که چند صد مایل از یکدیگر فاصله دارند. در زنجیره لورن، یک فرستنده به عنوان ایستگاه اصلی با علامت Master M و بقیه فرستنده‌ها به عنوان ایستگاه‌های ثانویه و با علامت‌های، X (Xvay)، W (Whiskey)، V (Victor)، Y (Yankee) و Z (Zulu) مشخص می‌شوند.

ایستگاه اصلی و ایستگاه‌های ثانویه پالس‌های رادیویی را در فواصل زمانی مشخص ارسال می‌نمایند. یک گیرنده لورن-C، اختلاف زمان ورود بین پالس‌های دریافتی از جفت ایستگاه‌ها را اندازه‌گیری می‌کند. اندازه‌گیری اختلاف زمانی، گیرنده را در مکانی در امتداد یک خط مکان‌یاب هذلولوی قرار می‌دهد. همان‌طور که از شکل (۱) مشخص است، فصل مشترک دو یا چند خط مکان‌یاب هذلولوی که توسط دو یا چند اندازه‌گیری‌های اختلاف زمانی ایجاد می‌شود، مکان گیرنده را تعریف می‌کند.

هستند که اغلب سبب ایجاد خطاهای غیرقابل قبولی در گیرنده شده و از این رو پوشش سامانه‌های لورن-C را کاهش می‌دهند [۱۲]. CWI سبب ایجاد خطاهایی در اندازه‌گیری TOA (زمان ورود) می‌گردد، چرا که بر روی ردیابی فاز تأثیر می‌گذارد. همچنین ممکن است سبب گزینش چرخه‌ی نادرست شود که در این صورت منجر به حداقل ۱۰ میکرو ثانیه خطای زمان‌بندی در اندازه‌گیری TOA می‌شود. گیرنده لورن C استاندارد از فیلتر میان‌گذر برای حذف CWI غیرهم‌زمان استفاده می‌نماید، اما این فیلتر دو نوع دیگر را نمی‌تواند حذف کند. طیف فرکانسی CWI شامل طیف گسسته خطی می‌باشد، با توجه به این مفهوم سیگنال CWI را می‌توان به صورت دسته‌ای از موج سینوسی خالص با فرکانس‌های مشخص و همچنین دامنه‌های متفاوت مدل نمود [۱۳]. در گیرنده لورن-C سیگنال وارد شونده، ابتدا وارد فیلتر میان‌گذر می‌شود. پهنای باند این فیلتر بسته به نوع آن بین ۱۵ الی ۴۰ کیلو هرتز می‌باشد که فرکانس مرکزی این فیلتر روی فرکانس حامل ۱۰۰ KHz قرار دارد [۱۴]. گیرنده لورن C موقعیت خود را با استفاده از اندازه‌گیری زمان رسیدن سیگنال امواج زمینی از ایستگاه‌های فرستنده رادیویی که ثابت هستند محاسبه می‌کند. CWI و برخی از سیگنال‌های مزاحم دقت اندازه‌گیری زمان رسیدن سیگنال امواج زمینی را پایین می‌آورند. برخی از محققین پژوهش‌های بسیاری را در زمینه‌ی چگونگی بهبود کارایی گیرنده‌ی لورن C انجام داده‌اند. برای مثال، در مراجع [۱۵ و ۱۶] دو نوع فیلتر مختلف برای گیرنده‌ی لورن C طراحی شده است. در مراجع [۲۰-۱۷] نیز قابلیت‌های کاهش تداخل ناشی از رمزگذاری فاز و گردآوری وابسته بر روی CWI هم‌زمان و شبه هم‌زمان به کار رفته است. از تمامی موارد ذکر شده در بالا می‌توان مشاهده نمود که فیلترهای انطباقی، رمزگذاری فاز و گردآوری وابسته می‌توانند تا حد زیادی CWI را کاهش دهند اما نمی‌توانند CWI هم‌زمان را به کلی حذف نمایند.

هدف از این مقاله تحلیل عملکرد یک الگوریتم پیشنهادی است، که به منظور حذف CWI هم‌زمان در سامانه لورن-C برای بهبود کارایی و افزایش دقت ناوبری ارائه گردیده است. الگوریتم پیشنهادی مطرح شده مبتنی بر تحلیل ساختار پالس‌های لوران C در حوزه زمان می‌باشد. با این روش می‌توان تاثیرات CWI هم‌زمان بر روی گیرنده‌ی لورن را به طور کامل حذف کرده و دقت اندازه‌گیری‌های مربوط به زمان ورود (TOA) را تا میزان زیادی بهبود بخشید.

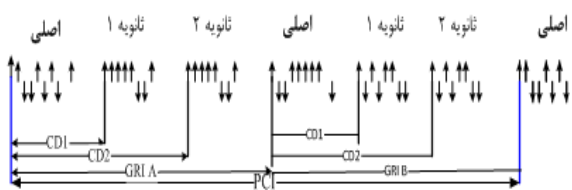
در ادامه و در بخش ۲، ابتدا به معرفی سامانه ناوبری لورن و نحوه انتشار سیگنال آن پرداخته شده است. در بخش ۳، به



شکل (۳). الگوهای زمانی پالس ایستگاه‌های اصلی و ثانویه [۲۶]

در داخل هر گروه پالسی، هر پالس با یک فاز حامل که یا صفر درجه (کد فاز مثبت) و یا ۱۸۰ درجه (کد فاز منفی) است، ارسال می‌شود. سیگنال‌های لورن با یک دنباله کد فاز ثابتی ارسال می‌شوند که در طول دو گروه پالس متوالی امتداد دارد و سپس تکرار می‌شوند. این روش به‌عنوان کدینگ فاز شناخته می‌شود. بنابراین یک دنباله دقیقی از پالس‌ها هر دو برابر بازه تکرار گروهی یک‌بار تکرار می‌شوند. به‌عبارت دیگر سیگنال لورن، متناوب با دوره تناوب دو برابر بازه تکرار گروهی می‌باشد. این دوره تناوب اصطلاحاً بازه کد فاز^۲ نامیده می‌شود [۲۵]. این الگوی کد فاز برای فرستنده‌های اصلی و ثانویه متفاوت است و به منظور کاهش اثر تداخل و نویز روی فواصل زمانی اندازه‌گیری و همچنین به منظور کمک به تمیز بین ایستگاه‌های اصلی و ثانویه، استفاده می‌شود. الگوی فوق در شکل (۴) نمایش داده شده است [۲۷].

ایستگاه رادیویی		
گروه	ایستگاه رادیویی اصلی	ایستگاه رادیویی فرعی
A	+ + - - + - + +	+ + + + - - +
B	+ - - + + + + -	+ - + - + + - -



شکل (۴). پالس‌های ارسالی با یک الگوی مشخص [۲۸].

۲-۱- شکل پالس

در شکل (۵)، یک پالس لورن استاندارد با کد فاز صفر نشان داده شده است. فرم ریاضی یک پالس لورن استاندارد در زیر آورده شده است [۲۳ و ۲۹]:

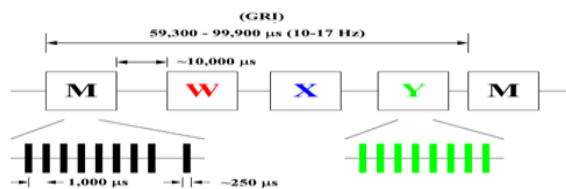
$$i(t) = A(t - \tau)^2 \exp\left(-2\left(\frac{t - \tau}{65}\right)\right) \sin(\omega t + \phi) \text{ for } \tau \leq t \leq \tau + 65$$



شکل (۱). مکان گیرنده لورن در فصل مشترک خطوط مکان‌یاب هذلولوی است.

هر رشته از سیگنال‌های ارسالی شامل یک گروه پالس ارسالی از ایستگاه اصلی M و گروه‌های پالس ارسالی از فرستنده‌های ثانویه است که در فواصل زمانی مشخص از گروه پالس ارسالی از ایستگاه اصلی پخش می‌شوند (شکل ۲). به‌طور خلاصه سیگنال ارسالی شامل گروهی از پالس‌هاست. سیگنال ارسالی از فرستنده اصلی دارای ۹ پالس (۸ پالس با فاصله ۱۰۰۰ μ sec و آخری با فاصله ۲۰۰۰ μ sec) است.

ارسال به صورت پالس به دلیل کاهش دادن مورد نیاز ارسالی، سهولت تشخیص سیگنال و زمان‌بندی دقیق سیگنال‌های ارسالی انتخاب شده است. ایستگاه‌های ثانویه فقط ۸ پالس ارسال می‌نمایند که این پالس‌ها با فاصله زمانی ۱۰۰۰ μ sec از یکدیگر قرار دارند. این اختلاف در تعداد پالس‌ها به علاوه دیگر مشخصات سیگنال باعث می‌شود تا گیرنده‌های لورن C-سیگنال‌های دریافتی از ایستگاه‌های اصلی و ثانویه را از یکدیگر تشخیص دهند. فاصله زمانی بین ارسال موفق گروه پالس‌ها توسط ایستگاه اصلی، فاصله تکرار گروه (GRI) نامیده می‌شود که در شکل (۲) نشان داده شده است. GRI بر حسب میکروثانیه بیان می‌شود. مشخصه GRI برابر با مقدار GRI تقسیم بر ۱۰ می‌باشد که به‌عنوان علامتی برای مشخص نمودن زنجیره لورن به کار می‌رود.



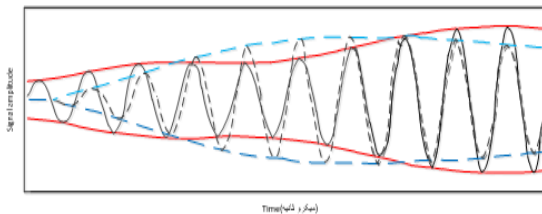
شکل (۲). محدودیت‌هایی برای تاخیر انتشار موج [۲۵]

شکل (۳) الگوهای پالس ایستگاه‌های اصلی و ثانویه به همراه اطلاعات زمانی آن‌ها را نشان می‌دهد. گروه پالس‌های ایستگاه‌های ثانویه در ادامه گروه پالس ایستگاه اصلی آورده شده است [۲۶].

این رو پوشش سامانه‌های لورن-C را کاهش می‌دهند [۸-۱۰].

CWI می‌تواند زمان تقاطع صفر مورد اندازه‌گیری را تغییر دهد (شکل ۶)، این خطای زمانی تابعی از نسبت سیگنال به تداخل (SIR) و فاز عامل تداخلی مربوط به آن چرخه از لورن-C می‌باشد. دلیل این‌که چرا هر سه نوع CWI سبب ایجاد تأثیرات متفاوتی می‌شوند، زمانی به وضوح قابل مشاهده است که عملکرد یک حلقه‌ی ردیابی فاز دیجیتال و قفل شده فازی (DPLL) در نظر گرفته شود. این DPLL به منظور کمینه ساختن تأثیرات ناشی از تداخل از نمونه‌های حاصل از پالس‌های متوالی لورن-C نمونه‌گیری می‌کند.

خطای موجود در نمونه‌های تکی، که توسط یک CWI هم‌زمان ایجاد می‌شود، در طول 2GRI تکرار می‌شود، بنابراین یک جابه‌جایی ثابت در خروجی حلقه مشاهده می‌شود. در CWI شبه هم‌زمان، رابطه زمانی عامل تداخلی با سیگنال لورن، به‌طور تدریجی در طول بسیاری از دسته‌های 2GRI تغییر می‌کند؛ از این رو خطای TOA به‌طور آهسته در طول گستره‌ای از مقادیر ممکن به گردش در می‌آید. خطای تقاطع صفر ناشی از یک CWI غیرهم‌زمان به‌طور چشمگیری در طول وقفه‌های 2GRI تغییر کرده و سبب ایجاد خطایی شبیه به نویز در TOA می‌شود.



شکل (۶). تغییر شکل ایجاد شده در جهش لورن-C که ناشی از یک CWI واحد می‌باشد.

یکی از ویژگی‌های مهم سیگنال لورن-C، که به کاهش خطاهای ناشی از CWI کمک می‌کند، کد کردن فاز آن است. یک CWI هم‌زمان در ۱۰۰ KHz را در نظر بگیرید. اگر هیچ‌گونه کد کردن فازی موجود نباشد، خطاهای تقاطع صفر در هر ۱۶ پالس موجود در 2GRI برابر خواهند بود. میانگین‌گیری از اندازه‌گیری‌های انجام شده نیز تغییری ایجاد نخواهد کرد. با کد کردن فاز، تغییر جهت‌های جهش‌های کد شده مثبت و منفی در تضاد با یکدیگر بوده و هنگام میانگین‌گیری متمایل به خنثی کردن هم هستند. ایستگاه‌های لورن-C در هر دوره 2GRI، ۱۰ کد فاز مثبت و ۶ کد فاز منفی را انتقال می‌دهند، بنابراین میزان کاهش خطا $\left(\frac{10-6}{16}\right) = \frac{1}{4}$ ، یا به عبارتی ۱۲dB می‌باشد. به‌طور کلی، کاهش تأثیرات ناشی از CWI که به‌واسطه کد کردن فاز ایجاد می‌شود، برحسب فرکانس و به گونه‌ای پیچیده متغیر است.

$$i(t) = 0 \text{ for } t \leq \tau \quad (1)$$

که در این روابط:

A: جریان مربوط به پیک جریان (بر حسب آمپر)

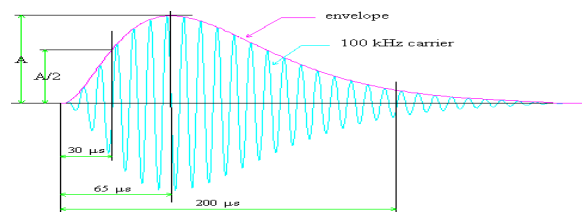
t: زمان (بر حسب میکروثانیه)

ϕ : کد فاز^۱ (بر حسب رادیان) که صفر برای کد فاز مثبت و π برای کد فاز منفی است.

τ : تفاضل پوش از سیکل^۲ (بر حسب میکروثانیه).

W: فرکانس حامل ($0.2\pi \text{ rad}/\mu\text{s}$).

لازم به ذکر است، تغییر شکل مهمی که بین جریان آنتن و میدان الکتریکی دور رخ می‌دهد یک شیفت فاز حامل 90° است و منجر به یک تغییر تقریبی $2.5 \mu \text{ sec}$ در تفاضل پوش از سیکل می‌شود [۳۰].



شکل (۵). ساختار پالس لورن [۳۰]

۳- تأثیرات تداخل موج پیوسته بر روی گیرنده لورن C

CWI ممکن است سبب ایجاد خطاهایی در اندازه‌گیری TOA گردد، چرا که بر روی ردیابی فاز تأثیر می‌گذارد. همچنین ممکن است سبب گزینش چرخه‌ی نادرست شود که در این صورت منجر به حداقل ۱۰ میکرو ثانیه خطای زمان‌بندی در اندازه‌گیری TOA می‌شود. تحقیقات و پژوهش‌های پیشین ثابت کرده‌اند که CWI را می‌توان برحسب رابطه‌ی فرکانس آن با سیگنال لورن C طبقه‌بندی کرد. معیارهای حداقل میزان کارایی (MPS)، سه نوع CWI هم‌زمان، شبه هم‌زمان و غیرهم‌زمان را مشخص می‌کنند. این نوع از تداخل‌های موج حامل خطاهایی با ویژگی‌های متفاوت ایجاد می‌کنند. CWI هم‌زمان سبب ایجاد یک جابه‌جایی ثابت در اندازه‌گیری TOA می‌گردد، CWI شبه هم‌زمان سبب ایجاد یک جابه‌جایی نوسانی شده و CWI غیرهم‌زمان نیز سبب یک جابه‌جایی شبیه به نویز می‌شود. تحقیقات ثابت کرده‌اند که CWI هم‌زمان و شبه هم‌زمان هستند که اغلب سبب ایجاد خطاهای غیرقابل قبولی در گیرنده شده و از

1- Phase Code

2- Envelope to Cycle Difference (ECD)

$y_1(t)$ که بیانگر تناسب سیگنال مرکب به واسطه سیگنال لورن C است و دیگری $y_2(t)$ ، که بیانگر تناسب ایجاد شده توسط تداخل می‌باشد. توانایی این عملکرد تجزیه در این واقعیت است که، اگر $y_1(t)$ را بتوان به‌طور مجزا از $x_L(t)$ و $y_2(t)$ را نیز به‌طور مجزا از $x_{int}(t)$ محاسبه نمود، در آن صورت می‌توان بهبود SIR و یا میزان تضعیف CWI تأمین شده توسط میانگین‌گیری و کدگشایی فاز را محاسبه نمود. نخست $y_1(t)$ را با جایگزینی معادله (۲) در معادله (۵) محاسبه می‌کنیم:

$$y_1(t) = \frac{1}{16N} \sum_{n=1}^N [\sum_{m=1}^{16} x_L(t) * \delta(t + t_m + t_n) pc(m)] = x_o(t) \quad (۶)$$

این معادله نشان می‌دهد که نمونه‌ها پس از این که کدگشایی می‌شوند، از لحاظ اندازه در تمام پالس‌ها یکسان هستند. میانگین‌گیری آن‌ها نیز این میزان را تغییر نخواهد داد. این نکته توسط تساوی $y_1(t) = x_o(t)$ در معادله نشان داده می‌شود. اینک $y_2(t)$ با جایگزینی معادله (۴) در معادله (۵) محاسبه می‌شود:

$$y_2(t) = \frac{1}{16N} \sum_{n=1}^N [\sum_{m=1}^{16} x_{int}(t) * \delta(t + t_m + t_n) pc(m)] \quad (۷)$$

با گرفتن تبدیل فوریه از دو طرف معادله (۷) داریم

$$y_2(f) = X_{int}(f) \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [\exp(j2\pi f t_n)] \times \left[\frac{1}{16} \sum_{m=1}^{16} [\exp(j2\pi f t_m) pc(m)] \right] \quad (۸)$$

با تقسیم $y_2(f)$ بر $X_{int}(f)$ تابع تغییر فرکانس سیگنال تداخلی که ناشی از میانگین‌گیری و کدگشایی فاز می‌باشد به‌دست می‌آید. دامنه این تابع تغییر فرکانس، که «مردودسازی» نامیده می‌شود، را می‌توان برای هر فرکانس تداخل (f_{int}) به شکل زیر ارزیابی نمود:

$$rejection(f_{int}) = \left| \frac{\frac{1}{16} \sum_{m=1}^{16} [\exp(j2\pi f_{int} t_m) pc(m)] \times \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [\exp(j2\pi f_{int} t_n)] \right]}{\left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [\exp(j2\pi f_{int} t_n)] \right]} \right| \quad (۹)$$

معادله (۸) را می‌توان به شکل زیر خلاصه نمود:

$$rejection(f_{int}) = R_1(f_{int}) R_2(f_{int}) \quad (۱۰)$$

که در آن $R_1(f_{int})$ و $R_2(f_{int})$ به صورت زیر به‌دست می‌آیند:

$$R_1(f_{int}) = \left| \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N [\exp(j2\pi f_{int} t_m)] \right| \quad (۱۱)$$

۴- تضعیف CWI توسط میانگین‌گیری و کدگشایی فاز

اگرچه سیگنال لورن-C متشکل از رشته پالس‌های نامحدودی است، همان‌گونه که در معادله (۲) توصیف شده است، یک گیرنده عملاً اندازه‌گیری‌های انجام شده بر روی پالس‌های موجود در تنها شمار محدودی از دوره‌های 2GRI را پردازش می‌کند [۲۷]. سیگنال در درون این N دوره را می‌توان به صراحت با جمع پیچیدگی‌های یک رشته از پالس‌ها به همراه یک جهش استاندارد از لورن C نشان داد. از این رو لورن C مورد پردازش را می‌توان به شکل زیر توصیف کرد:

$$X_L(t) = \sum_{n=1}^N [\sum_{m=1}^{16} x_o(t) * \delta(t - t_m) pc(m)] * \delta(t - t_n) \quad (۲)$$

که در آن t_n بیانگر زمان 2GRI است که معادل $t_n = (n-1) 2GRI$ می‌باشد. کدگشایی فاز توسط ضرب PC (m) ازایه می‌شود. تعداد N مربوط به پهنای باند ردیابی است که در حلقه‌های گزینش چرخه و ردیابی فاز، متفاوت می‌باشد. در صورت وجود CWI، سیگنال مرکب از طریق سیگنال لورن C ($X_L(t)$) و تداخل $x_{int}(t)$ به‌دست می‌آید:

$$X_O(t) = X_L(t) + X_{int}(t) \quad (۳)$$

به منظور ساده‌سازی تحلیل، فرض می‌شود تداخل موجود، یک موج پیوسته واحد با فرم زیر است:

$$X_{int}(t) = I \sin(2\pi f_{int} t + \phi_{int}) \quad (۴)$$

که در آن، I و f_{int} به ترتیب بیانگر دامنه و فرکانس تداخل می‌باشند و نیز نشان‌دهنده‌ی فاز نسبی سیگنال لورن C است. عملکردهای میانگین‌گیری و کدگشایی فاز در سیگنال لورن C دریافتی در این سیگنال مرکب نیز اعمال می‌شود. میانگین‌گیری توسط جمع زدن نقاط متناظر در پالس‌های متوالی انجام می‌شود. کدگشایی فاز نیز از طریق ضرب هر پالس در کد فاز آن به‌دست می‌آید. این سیگنال مرکب پردازش شده را می‌توان به شکل زیر توصیف کرد:

$$y(t) = \frac{1}{16N} \sum_{n=1}^N [\sum_{m=1}^{16} x_o(t + t_m + t_n) pc(m)] \quad (۵)$$

تنظیم و نحوه بیان معادله (۵) گام مهمی در تحلیل کمی تأثیرات ناشی از CWI بر روی گیرنده‌ها می‌باشد. این نحوه بیان، توصیفی از تضعیف CWI ناشی از میانگین‌گیری و کدگشایی فاز را در اختیار ما قرار می‌دهد. رابطه خطی موجود در معادلات (۳ و ۵) امکان تجزیه $y(t)$ به دو بخش را فراهم می‌کند: یکی

میانگین‌گیری، تابعی از N و q_{int} می‌باشد. همچنین ثابت می‌کند که تضعیف CWI ناشی از میانگین‌گیری، متناوب بوده و دارای دوره‌ای معادل $\frac{1}{2GRI}$ است. زمانی که $q_{int} = 0$ باشد، به راحتی می‌توان ثابت نمود که $R_1(f_{int}) = 1$ می‌باشد. این نکته حاکی از این است که عملکرد میانگین‌گیری هیچ‌گونه تضعیفی در CWI هم‌زمان فراهم نمی‌کند. [۳۱ و ۲۱].

۴-۱- خطاهای زمان ورود ناشی از CWI

در این بخش خطاهای موجود در اندازه‌گیری TOA، که ناشی از یک CWI واحد می‌باشد، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است [۲ و ۳۰]. میزان و حجم خطای اندازه‌گیری TOA توسط توان و فاز CWI نسبت به توان و فاز سیگنال لورن C تعیین می‌شود. یک CWI واحد منجر به خطایی در اندازه‌گیری زمان ورود می‌شود که بدین شرح است (برحسب میکرو ثانیه):

$$TOA_{ERROR} = \frac{10}{2\pi} \sin^{-1}\left(\frac{I}{C} \sin(\phi_{int})\right) \quad (16)$$

در این فرمول، $C = \sqrt{I^2 + S^2} + 2IS \cos(\phi_{int})$ می‌باشد و S نیز بیانگر دامنه سیگنال لورن C در نقطه نمونه‌گیری است.

زمانی که $I < S$ باشد، معادله (۱۵) را می‌توان به شکل زیر ساده نمود:

$$TOA_{ERROR} = \frac{10}{2\pi} \left(\frac{I}{S} \sin(\phi_{int})\right) \quad (17)$$

در این معادله واضح است که زمانی که $\phi_{int} = \frac{\pi}{2}$ باشد، خطای موجود به حداکثر میزان خود می‌رسد و از طریق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$(TOA_{ERROR})_{max} = \frac{10}{2\pi} \left(\frac{I}{S}\right) \quad (18)$$

به‌طور رایج، نسبت سیگنال به تداخل لورن C (SIR) از طریق فرمول زیر به دست می‌آید:

$$SIR = \left(\frac{I}{S}\right) \quad (19)$$

معادله (۱۸) نشان می‌دهد که حداکثر میزان خطا در اندازه‌گیری TOA مستقل از فرکانس است، اما تابعی از SIR می‌باشد. البته این نتیجه‌گیری از عملکردهای فیلترینگ پایانه‌ی جلویی، کدگشایی فاز و میانگین‌گیری چشم‌پوشی می‌کند. معادله‌ی ۱۸ صرفاً حداکثر میزان انحراف تقاطع صفر از یک پالس واحد مطابق با SIR را در ورودی گیرنده شرح می‌دهد. برای در نظر گرفتن تضعیف CWI ناشی از پردازش سیگنال، معادله (۱۸)

$$R_2(f_{int}) = \left| \frac{1}{16} \sum_{m=1}^{16} [\exp(j2\pi f_{int} t_m) pc(m)] \right| \quad (12)$$

هم $R_1(f_{int})$ و هم $R_2(f_{int})$ هر دو وابسته به فرکانس می‌باشند. با این حال باید توجه داشت که عبارت «کدگشایی فاز» تنها در $R_2(f_{int})$ ظاهر می‌شود. این معادلات ابزار مفیدی در مطالعه و بررسی تأثیرات انواع مختلف CWI و توانایی گیرنده‌ها در حذف آن‌ها می‌باشد. برای سهولت $R_2(f_{int})$ را مردودسازی CWI ناشی از کدگشایی فاز و $R_1(f_{int})$ را نیز مردودسازی CWI ناشی از میانگین‌گیری می‌نامیم.

به منظور بررسی وابستگی فرکانس تضعیف CWI، طبق تعریف طبقه‌بندی (MPS)، CWI را برحسب q_{int} بازنویسی می‌کنیم [۳۲-۳۳]. یک پارامتر اندازه‌گیری اختلاف فرکانس عامل تداخلی و نزدیک‌ترین خط طیفی از سیگنال لورن C که به شکل زیر توصیف می‌شود:

$$f_{int} = \frac{N_{int} + q_{int}}{2GRI} \quad (13)$$

که در آن، $N_{int} = 1, 2, 3, 4, \dots$ بوده و $-0.5 < q_{int} \leq 0.5$ می‌باشد. برای انواع مختلف CWI، مقدار q_{int} به شرح زیر است:

$$|q_{int}| = 0 \rightarrow \text{برای CWI هم‌زمان}$$

$$|q_{int}| > f_b 2GRI \rightarrow \text{برای CWI غیرهم‌زمان}$$

$$|q_{int}| < f_b 2GRI \rightarrow \text{برای CWI شبه هم‌زمان}$$

نخست عبارت $R_2(f_{int})$ را در نظر می‌گیریم که بیانگر تضعیف CWI ناشی از کدکردن فاز است.

$$R_2(f_{int}) = \left| \frac{1}{16} \sum_{m=1}^{16} [\exp(j2\pi \frac{N_{int} + q_{int}}{2GRI} t_m) pc(m)] \right| \quad (14)$$

تضعیف ناشی از کدگشایی فاز مبتنی بر فرکانس CWI و نیز GRI سیگنال لورن C می‌باشد. این تحلیل ثابت می‌کند که نسبت مردودسازی ناشی از کدگشایی فاز بر طبق فرکانس تداخلی در یک شیوه پیچیده و برای یک GRI معین، متغیر است.

تضعیف انواع گوناگون CWI ناشی از میانگین‌گیری از طریق جایگزینی معادله (۱۴) در معادله (۱۲) و با توجه به این‌که $t_n = (n-1)2GRI$ است؛ به دست می‌آید:

$$R_1(f_{int}) = \left| \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \exp\left(j2\pi \frac{N_{int} + q_{int}}{2GRI} (n-1)2GRI\right) \right| = \left| \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \exp(j2\pi [N_{int} + q_{int}](n-1)) \right| \quad (15)$$

این معادله نشان می‌دهد که تضعیف CWI ناشی از

که، $x_g(t)$ بیانگر موج زمینی در سامانه لورن c است، که تعیین موقعیت با استفاده از آن انجام می‌شود. $x_s(t)$ بیانگر امواج آسمانی است. $CWI(t)$ نشان دهنده CWI بوده و $n_1(t)$ و $n_2(t)$ نیز بیانگر نویز هستند. بنابراین سیگنال مزاحم را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$X_{int}(t) = CWI(t) + n(t), n(t) = \frac{1}{2} (n_1(t) + n_2(t)) \quad (23)$$

پس می‌توان نوشت:

$$X_1(t) = X_g(t) + X_s(t) + CWI(t) + \frac{n_1(t) + n_2(t)}{2} + \left(\frac{n_1(t) - n_2(t)}{2} \right) \quad (24)$$

از طرفی $x_{int}(t) = CWI(t) + n(t)$ پس:

$$X_1(t) = X_g(t) + X_s(t) + X_{int}(t) + \left(\frac{n_1(t) - n_2(t)}{2} \right) \quad (25)$$

و به همین صورت برای

$$X_3(t) = -X_g - X_s(t) + X_{int}(t) + \left(\frac{n_2(t) - n_1(t)}{2} \right) \quad (26)$$

با جمع این دو پالس رسیده و اعمال فرضیات بالا داریم:

$$X_1(t) + X_3(t) = 2X_{int}(t) \Rightarrow X_{int}(t) = \frac{X_1(t) - X_3(t)}{2} \quad (27)$$

البته بایستی توجه داشت که زمانی می‌توان این جمع را انجام داد که تداخل در شروع پالس سوم دقیقاً هم‌فاز با شروع پالس اول باشد که این دقیقاً طبق تعریف یعنی تداخلات هم‌زمان. چون اختلاف این دو پالس از همدیگر ۲۰۰۰ میکرو ثانیه است، بنابراین تنها فرکانس‌های تداخلی را می‌توان به‌طور دقیق تخمین زد که مضرب صحیحی از فرکانس زیر باشد.

$$f_{in} = \frac{1}{1000 \times 10^{-6}} = \frac{10^6}{1000} = 1000 \text{ Hz} \quad (28)$$

یعنی با استفاده از الگوریتم پیشنهادی می‌توان تمامی تداخلات با فرکانس‌های به صورت $100 \text{ KHz} \pm n(1) \text{ KHz}$ را تخمین زد که در آن n یک عدد صحیح است. از همه مهمتر فرکانس تداخلی ۱۰۰ KHz می‌باشد که باعث تخریب مکان‌یابی به‌خصوص زمانی که SIR پایین باشد می‌شود و با استفاده از

را می‌توان تغییر داد و به شکل زیر ارائه نمود:

$$TOA_{ERROR} = R_F(f_{int})R_1(f_{int})R_2(f_{int}) \frac{10}{2\pi} \frac{1}{S} \quad (20)$$

که در آن $R_F(f_{int})$ بیانگر تضعیف CWI ناشی از فیلترینگ پایانه‌ی جلویی، $R_1(f_{int})$ بیانگر تضعیف CWI ناشی از میانگین‌گیری نمونه‌های سیگنال است که به فاصله‌ی 2GRI از یکدیگر قرار گرفته‌اند و $R_2(f_{int})$ نیز نشان‌دهنده‌ی تضعیف CWI ناشی از کدگشایی فاز در محدوده‌ی هر 2GRI می‌باشد. در این حالت معادله‌ی ۲۰ حداکثر میزان خطای موجود در اندازه‌گیری TOA را در صورت وجود یک عامل تداخلی واحد از CWI، به‌طور کامل شرح می‌دهد. عامل تضعیف $R_1(f_{int})$ و $R_2(f_{int})$ که در بالا حاصل شد را می‌توان به‌طور مستقیم به‌کار برد و $R_F(f_{int})$ نیز باید با استفاده از روش توصیف شده در بالا، هم تضعیف CWI و هم تضعیف پالس را مدنظر قرار دهد.

۵- روش پیشنهادی (حذف تداخل CWI هم‌زمان با استفاده از حوزه زمان)

به منظور تجزیه و تحلیل الگوریتم پیشنهادی، نخست این فرضیه‌ها را ارائه می‌دهیم:

۱) نسبت سیگنال به تداخل به اندازه‌ای است که یک تخمین قابل قبولی از زمان ورود سیگنال، قبل از این‌که تداخل آن حذف شده باشد می‌توان زد. (با دقت ۱۲۵ میکرو ثانیه تخمین اولیه قابل قبول است و باعث خطا در روش پیشنهادی و تخمین عبور از صفر سوم بعد از حذف تداخل نمی‌گردد)

۲) در مدت زمان کوتاهی، مسیر انتقال امواج آسمانی تغییر ناپذیر است، یعنی تاخیر در انتقال امواج آسمانی در طول یک دوره‌ی کوتاه، ثابت می‌باشد.

با توجه به سیگنال ارسالی در سامانه لورن مشاهده می‌شود که عرض هر پالس ۲۵۰ میکرو ثانیه است و کد فاز در پالس اول صفر درجه و در پالس سوم ۱۸۰ درجه است. همچنین اختلاف زمانی بین هر پالس با پالس بعدی در هر یک از ایستگاه‌های ارسال ۱۰۰۰ میکرو ثانیه است. بنابراین اختلاف زمانی بین پالس اول ایستگاه اصلی و پالس سوم آن ۲۰۰۰ میکرو ثانیه است. برای پالس اول چون $pc=0$ است، بنابراین پالس لورن C را می‌توان به شکل زیر بیان کرد:

$$x_1(t) = x_g(t) + x_s(t) + CWI(t) + n_1(t) \quad (21)$$

برای پالس سوم، چون $pc = \pi$ است می‌توان نوشت:

$$X_3(t) = -X_g(t) - X_s(t) + CWI(t) + n_2(t) \quad (22)$$

منبع در حالت کلی به دو روش انجام می‌شود: ۱- روش خود هم‌بستگی ۲- روش هم‌بستگی متقابل.

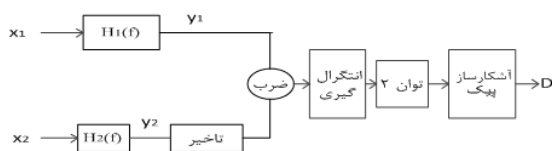
در روش خودهم‌بستگی می‌توان از ویژگی‌های سیگنال دریافتی استفاده کرد، به این صورت که بین یک نسخه مشابه سیگنال ارسال شده با سیگنال دریافتی هم‌بستگی گرفته می‌شود و از لحظه وقوع پیک برای به‌دست آوردن زمان ورود استفاده می‌شود [۱].

راه دیگر گرفتن هم‌بستگی متقابل بین دو سیگنال دریافتی در دو ایستگاه و تنظیم پارامتر زمانی برای یافتن لحظه وقوع پیک است. در روش دوم نیازی به داشتن نسخه مشابه سیگنال فرستنده نیست و مخصوصاً هنگامی که مشخصات سیگنال ارسالی در ابتدا مشخص نیست مناسب است. در ادامه بیشتر به این روش پرداخته شده است، چراکه تکنیک رایج‌تر برای تخمین TDOA تکنیک هم‌بستگی متقابل است [۳۶ و ۳۵].

۵-۱-۱- روش‌های هم‌بستگی متقابل کلی

در این روش‌ها بین سیگنال‌های فیلتر شده دریافتی در دو ایستگاه، هم‌بستگی متقابل گرفته می‌شود و تفاضل زمان ورود (D) بین دو ایستگاه به وسیله تعیین لحظه وقوع پیک هم‌بستگی به‌دست می‌آید. در روش‌های هم‌بستگی متقابل کلی برای محاسبه TDOA، از رابطه هم‌بستگی متقابل استفاده می‌شود [۱]. شکل (۸) این روش را نشان می‌دهد.

$$R_{X_1X_2}(\tau) = AR_S(\tau - D)e^{-j\pi\alpha D} \quad (29)$$



شکل (۸). روش هم‌بستگی متقابل کلی برای تخمین TDOA [۱]

مقدار آرگومان τ که رابطه (۲۸) را ماکزیمم می‌کند برابر است با مقدار تفاضل زمان ورود یعنی D، لذا رابطه (۲۸) را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$R_{X_1X_2}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} X_1(t)X_2(t - \tau) dt \quad (30)$$

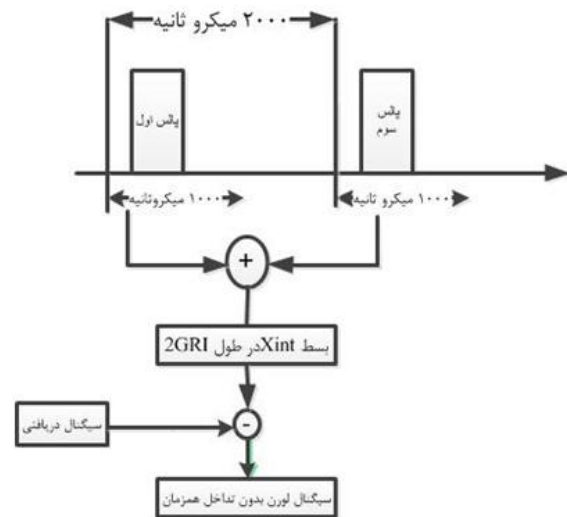
از آنجایی که $R_{X_1X_2}(\tau)$ را فقط در یک زمان مشاهده محدود می‌توان محاسبه کرد، بنابراین تخمین هم‌بستگی متقابل به این صورت خواهد بود:

$$\hat{R}_{X_1X_2}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T X_1(t)X_2(t - \tau) dt \quad (31)$$

میانگین‌گیری نیز قابل حذف نیست و حتی کاهش هم نمی‌یابد (برای این فرکانس $R_1(f_{int}) = 1$ است).

با بسط $x_{int}(t)$ به‌دست آمده در طول 2GRI، سیگنال تداخلی هم‌زمان در طول 2GRI به‌دست می‌آید. حال با کم کردن سیگنال لورن دریافتی در طول 2GRI از سیگنال تداخلی به‌دست آمده، تداخل از سیگنال لورن دریافتی حذف می‌گردد.

البته همان‌گونه که در بالا مشخص است بایستی یک تخمین اولیه از زمان ورود سیگنال لورن داشته باشیم تا بتوانیم از الگوریتم پیشنهادی بالا استفاده نماییم. با توجه به این‌که از مشخصات سیگنال استفاده می‌کنیم اگر این تخمین اولیه دقیق هم نباشد باعث ایجاد خطا در تخمین $x_{int}(t)$ نمی‌شود. مثلاً فرض کنید زمان ورود سیگنال $10 \mu\text{sec}$ است و به اشتباه $10 + b$ که $-125 \mu\text{sec} < b < 125 \mu\text{sec}$ تخمین زده شده است. چون برای پیدا کردن پالس سوم از اطلاعات سیگنال استفاده می‌شود یعنی چون می‌دانیم اختلاف زمان شروع پالس اول با زمان شروع پالس سوم $2000 \mu\text{sec}$ است، بنابراین باز هم نقطه $10 + b$ با نقطه $10 + b + 2000$ با هم، هم‌فاز هستند و تخمین $x_{int}(t)$ با مشکل مواجه نمی‌شود. شکل (۷) نحوه عملکرد الگوریتم پیشنهادی را به وضوح نشان می‌دهد.



شکل (۷). نحوه عملکرد الگوریتم پیشنهادی

با توجه به اینکه برای استفاده از الگوریتم پیشنهادی نیاز است تا یک تخمین اولیه از زمان ورود را داشته باشیم در ادامه تکنیک‌های تخمین تاخیر رسیدن یک سیگنال به ایستگاه‌های مختلف ارائه می‌گردد.

۵-۱- روش‌های تخمین زمان ورود

به‌دست آوردن تفاضل‌های زمانی رسیدن سیگنال از یک

$$S_a = [+1, +1, +1, +1, +1, -1, -1, +1] * P(t)$$

$p(t)$ پالس لورن ایده‌آل است. سپس هم‌بستگی سیگنال‌های s_a و m_a با سیگنال دریافتی، در نقطه‌ی شروع سیگنال محاسبه می‌شود. پس از تخمین زمان ورود از ابتدای پالس اول تا ۱۰۰۰ میکروثانیه از سیگنال را جدا نموده، همچنین از ابتدای پالس سوم (۲۰۰۰ میکروثانیه بعد از زمان ورود تخمین زده شده) تا ۱۰۰۰ میکروثانیه بعد از آن نیز جدا شده و باهم جمع می‌شوند. بعد از انجام این کار نتیجه بر ۲ تقسیم شده و در طول زمان به اندازه تعداد نمونه‌های مورد نیاز بسط داده می‌شود.

بخش سوم شامل حذف تداخل تخمین زده شده در بلوک دوم است. این کار به سادگی و با تفریق سیگنال دریافتی از تداخل تخمین زده شده انجام می‌شود.

توجه به این نکته ضروری است که در اینجا چون هدف صرفاً مقایسه روش پیشنهادی با روش مرسوم میانگین‌گیری در مواجهه با تداخل هم‌زمان است، برای مشخص شدن بهتر بهبود ناشی از روش، نویز در نظر گرفته نشده است. همان‌گونه که اشاره شده عامل محدود کننده در این روش نویز است و روش پیشنهادی حداکثر به اندازه ۳dB می‌تواند نویز را کاهش دهد. بنابراین اعداد و میزان بهبودهای به‌دست‌آمده برای سیگنال در اینجا غیر واقعی به نظر می‌رسد. در واقع این اعداد تنها با فرض وجود تداخل هم‌زمان که در عمل چنین حالتی به وجود نمی‌آید ایجاد شده است. البته این نکته نقطه ضعف روش نمی‌باشد و روش میانگین‌گیری نیز قادر به حذف نویز نمی‌باشد. برای حذف اثر نویز در کنار این الگوریتم‌ها می‌توان از روش‌های تطبیقی استفاده نمود.

در شکل‌های (۲۰-۹) صحت الگوریتم پیشنهادی با استفاده از نتایج شبیه‌سازی آن در شرایط $SIR = -6$ dB و فرکانس‌های تداخلی ۷۶، ۹۴، ۹۷، ۱۰۰، ۱۰۴، ۱۰۷ و ۱۲۴ کیلوهرتز نشان داده شده است. همچنین شکل‌های (۲۳-۲۰) نیز برای نسبت سیگنال به تداخل مختلف در سیگنال دریافتی، میزان خطا در اندازه‌گیری TOA را با استفاده از رابطه زیر نشان می‌دهد.

$$(TOA_{ERROR})_{max} = \frac{10}{2\pi} \left(\frac{I}{S} \right)$$

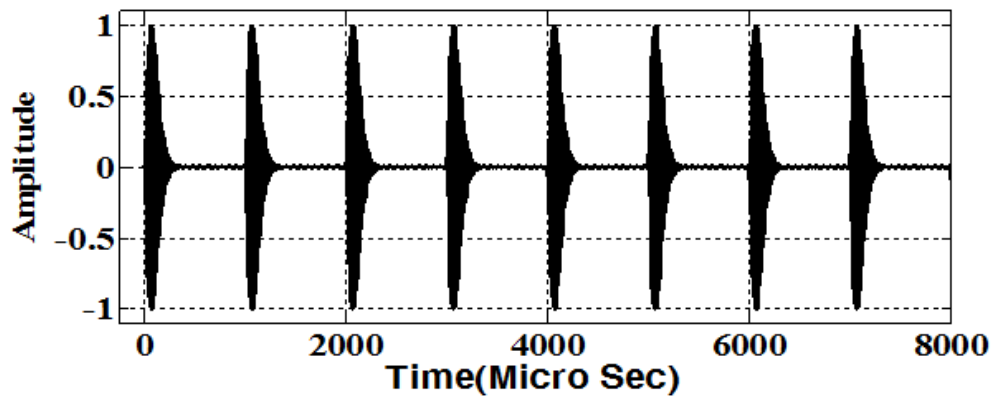
که T بازه مشاهده را نشان می‌دهد. به منظور افزایش دقت محاسبه تاخیر، قبل از انتگرال‌گیری در (۳۱) باید از فیلتر استفاده شود. با توجه به شکل (۸)، هر یک از سیگنال‌های $x_1(t)$ و $x_2(t)$ توسط فیلترهای $H_1(t)$ و $H_2(t)$ فیلتر می‌شود، سپس هم‌بستگی بین آن‌ها محاسبه می‌شود و به توان دو رسانده می‌شود. این عملیات برای بازه‌ای از شیفت‌های زمانی پارامتر τ انجام می‌شود تا پیک هم‌بستگی پیدا شود. پارامتر زمانی که باعث به وجود آمدن پیک هم‌بستگی متقابل می‌شود معادل تخمین تفاضل زمان ورود (\hat{D}) است. اگر بخواهیم یک تخمین بایاس نشده TDOA داشته باشیم، فیلترها باید مشخصات فرکانسی و فازی یکسانی داشته باشند و معمولاً باید فیلترهای مشابهی انتخاب شوند [۳۸ - ۳۷].

زمانی که فیلترهای $H_1(t) = H_2(t) = 1$ در تمام فرکانس‌ها باشند، تخمین \hat{D} به سادگی برابر لحظه وقوع پیک در هم‌بستگی متقابل است، که به پردازش هم‌بستگی متقابل مشهور است. پردازنده‌های دیگر عبارتند از: پردازنده پاسخ ضربه راس [۳۹]، تبدیل همدوس نرم (SCOT)، فیلتر اکارت [۳۸-۳۷] و پردازنده هانون تامسون یا تخمین‌زننده حداکثر شباهت (ML) [۴۰].

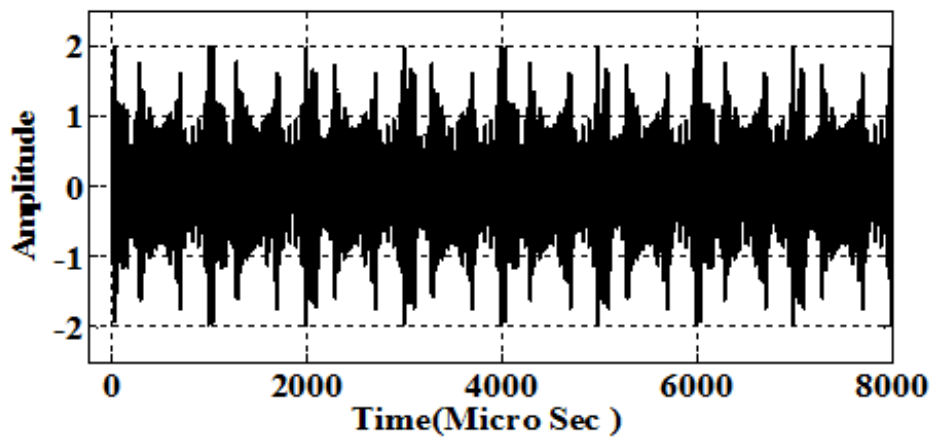
۶- شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی

مراحل انجام شبیه‌سازی شامل سه بخش است. در بخش اول پالس لورن به اضافه تداخل با فرکانس‌های ۷۶، ۹۴، ۹۷، ۱۰۰، ۱۰۴، ۱۰۷ و ۱۲۴ کیلوهرتز تولید می‌شود. بخش دوم، بلوک تخمین سیگنال تداخلی $x_{im}(t)$ است. در این بخش ابتدا یک تخمین اولیه از زمان ورود سیگنال زده می‌شود. برای الگوریتم تخمین TDOA با استفاده از رابطه هم‌بستگی بین سیگنال دریافتی (شامل سیگنال ارسالی از فرستنده اصلی که دارای ۹ پالس ۸ میکروثانیه با فاصله ۱۰۰۰ μ sec و آخری با فاصله ۲۰۰۰ μ sec) و سیگنال ارسالی از ایستگاه‌های ثانویه شامل ۸ پالس که این پالس‌ها با فاصله زمانی ۱۰۰۰ μ sec از یکدیگر قرار دارند می‌باشد) و سیگنال‌های s_a ، m_a نقطه‌ی شروع اولین پالس مشخص می‌شود. ابتدا سیگنال‌های s_a و m_a به صورت زیر ساخته می‌شوند:

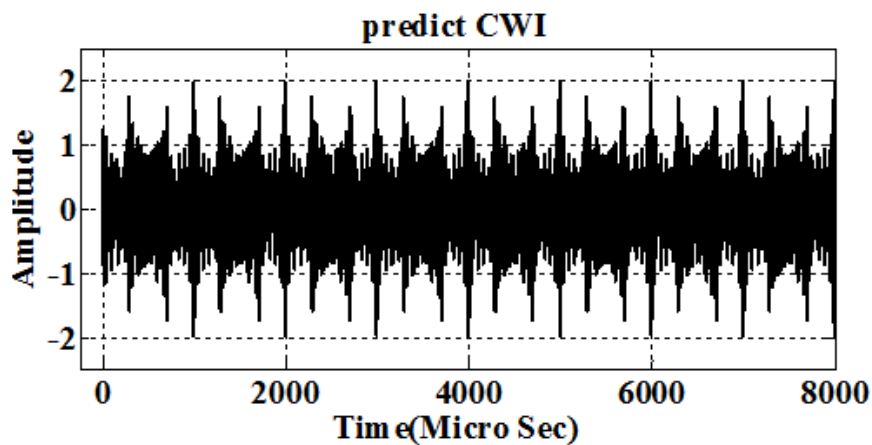
$$m_a = [+1, +1, -1, -1, +1, -1, +1, -1, +1] * P(t)$$



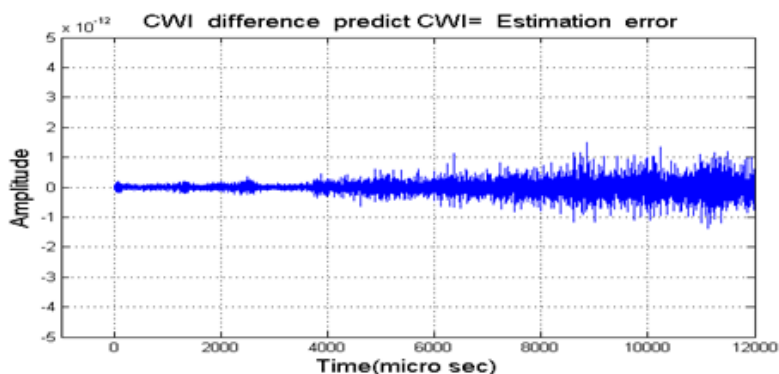
شکل (۹). سیگنال لورن استاندارد



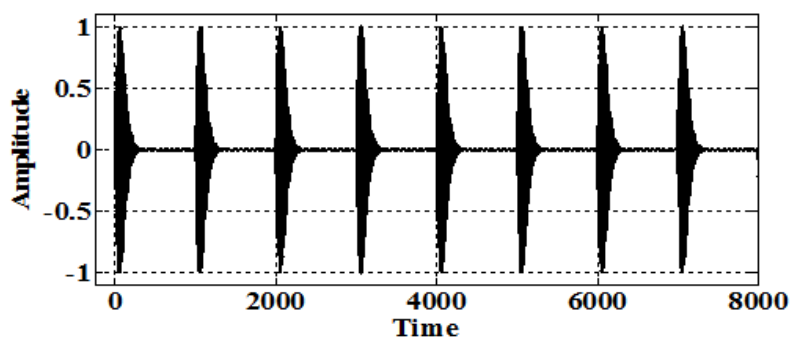
شکل (۱۰). سیگنال دریافتی (سیگنال به اضافه تداخل)



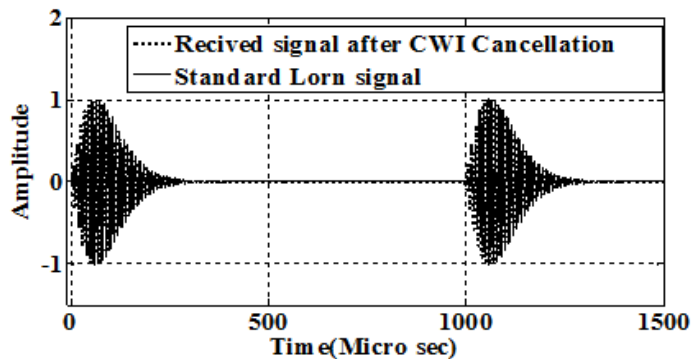
شکل (۱۱). سیگنال تداخلی تخمین زده شده با استفاده از الگوریتم پیشنهادی



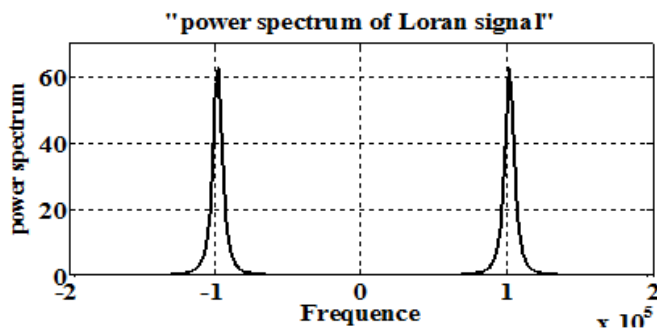
شکل (۱۲). تفاضل سیگنال تداخلی تخمین زده شده با سیگنال تداخلی واقعی (خطای تخمین)



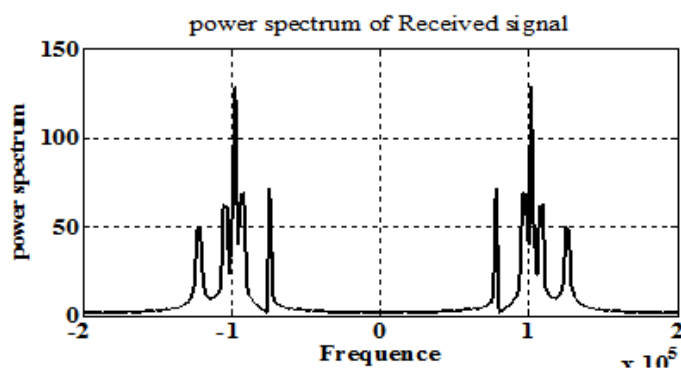
شکل (۱۳). سیگنال دریافتی پس از حذف تداخل



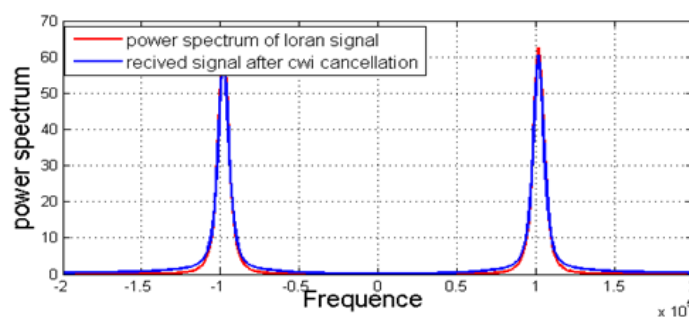
شکل (۱۴). مقایسه سیگنال استاندارد لورن (سیگنال ارسالی) با سیگنال تخمین زده شده



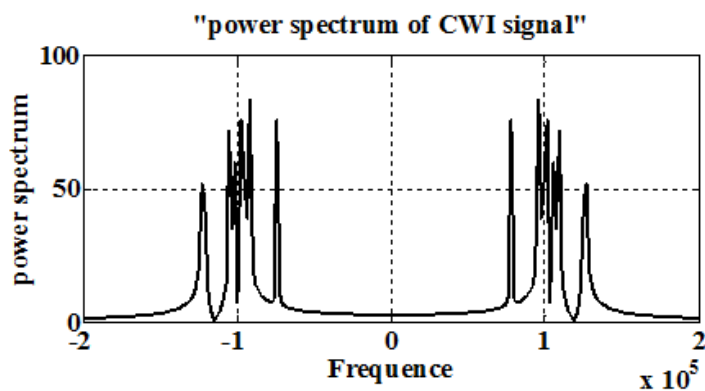
شکل (۱۵). طیف توان سیگنال لورن استاندارد



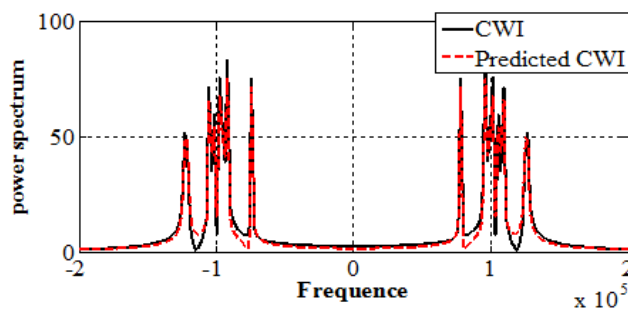
شکل (۱۶). طیف توان سیگنال دریافتی قبل از حذف تداخل



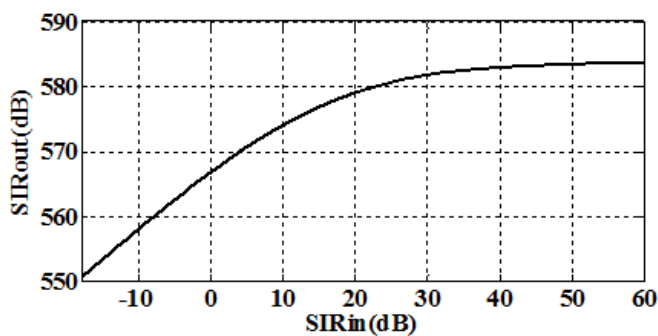
شکل (۱۷). مقایسه طیف توان سیگنال استاندارد لورن (سیگنال ارسالی) با طیف توان سیگنال تخمین زده شده



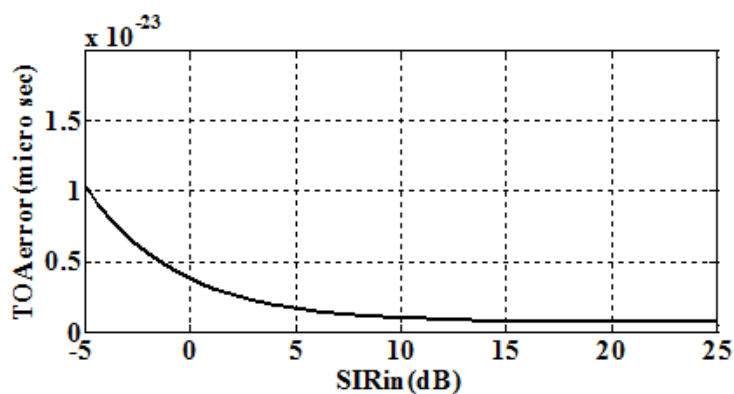
شکل (۱۸). طیف توان سیگنال تداخلی



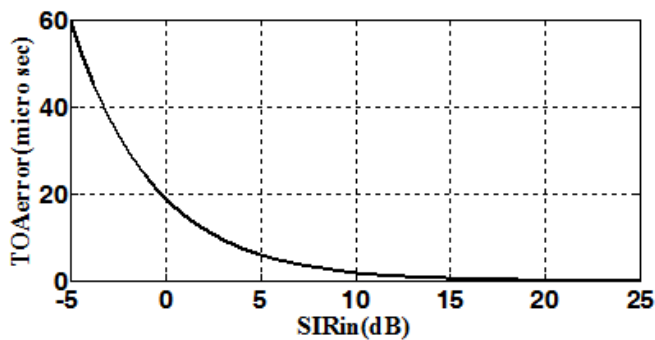
شکل (۱۹). مقایسه طیف توان سیگنال تداخلی تخمین زده شده با سیگنال تداخلی واقعی



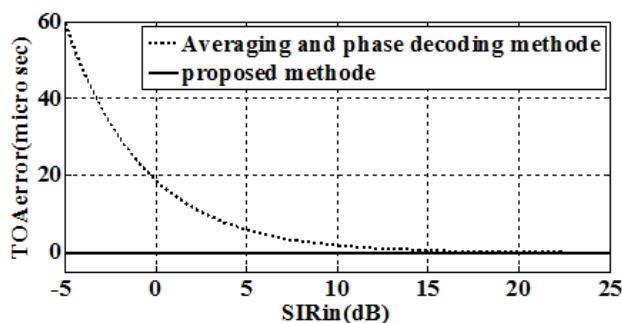
شکل (۲۰). تغییرات نسبت سیگنال به تداخل پس از اعمال الگوریتم پیشنهادی در برابر افزایش نسبت سیگنال به تداخل دریافتی



شکل (۲۱). حداکثر خطای TOA (بر حسب میکروثانیه) بعد از اعمال الگوریتم پیشنهادی برای فرکانس‌های تداخلی ۱۲۴ و ۱۰۷، ۱۰۴، ۱۰۰، ۹۷، ۹۴، ۷۶ نسبت SIRهای ورودی مختلف



شکل (۲۲). حداکثر خطای TOA بعد از اعمال الگوریتم میانگین‌گیری و کدگشایی فاز برای فرکانس‌های تداخلی ۱۲۴ و ۱۰۷، ۱۰۴، ۹۷، ۱۰۰، ۹۴، ۷۶ نسبت SIRهای ورودی مختلف



شکل (۲۳). مقایسه حداکثر خطای TOA (بر حسب میکروثانیه) بعد از اعمال الگوریتم میانگین گیری و کدگشایی فاز و اعمال الگوریتم پیشنهادی برای فرکانس های تداخلی ۰.۷۶، ۰.۹۴، ۱.۰۰، ۰.۹۷، ۱.۰۴، ۱.۰۷ و ۱.۲۴ و نسبت SIR های ورودی مختلف

جدول (۱). مقایسه میزان بهبود در کاهش خطای اندازه گیری TOA

SIRin (dB)	TOAerror (micro sec) in proposed method	TOAerror (micro sec) in Averaging and phase decoding method	نسبت بهبود
-۵	1×10^{23}	۶۰	60×10^{23}
۰	0.5×10^{23}	۲۰	40×10^{23}
۵	0.25×10^{23}	۱۰	40×10^{23}
۱۰	0.12×10^{23}	۳	26×10^{23}
۱۵	0.1×10^{23}	۱	10×10^{23}

آن‌ها مضرب صحیح ۱ کیلوهرتز، بیشتر یا کمتر از فرکانس سیگنال لورن باشد را حذف نماید.

نتایج به دست آمده از شبیه سازی الگوریتم مطرح شده نشان می دهد که روش پیشنهادی قابلیت حذف تداخل را به گونه ای موثر داشته و می تواند CWI هم زمان را حذف نموده و سیگنال لورن را عملاً بازسازی نماید. SIR موج زمینی تخمین زده شده، تحت شرایط الگوریتم پیشنهادی تقریباً مستقل از SIR سیگنال دریافتی بوده و دارای تغییرات بسیار کوچک می باشد. به عبارت دیگر تداخل برآورد شده، در شرایط این الگوریتم بسیار نزدیک به مقدار حقیقی آن می باشد. عامل محدود کننده در این الگوریتم SNR سیگنال دریافتی است. این الگوریتم برای اندازه گیری TOA، 10^{23} برابر بهبود در خطای اندازه گیری را نسبت به روش میانگین گیری و کدگشایی فاز از خود نشان می دهد. همچنین الگوریتم دارای پیچیدگی محاسباتی بسیار پایین تری نسبت به روش های موجود است. روش ارائه شده در این مقاله، به لحاظ بهبود کارایی گیرنده لورن از اهمیت بسیار بالایی به خصوص در شرایط تداخلی شدید (SIR سیگنال دریافتی بسیار پایین) برخوردار است.

نتایج حاصل از شبیه سازی بیانگر این است که الگوریتم پیشنهادی بهبود فوق العاده ای در حذف CWI هم زمان نسبت به روش میانگین گیری و کدگشایی فاز دارد و عملکرد آن تقریباً مستقل از SIR ورودی بوده و برای اندازه گیری TOA، 10^{23} برابر بهبود نسبی در خطای اندازه گیری را از خود نشان می دهد.

۷- نتیجه گیری

استفاده از سامانه زمین پایه لورن در ناوبری، به دلیل مصونیت در مقابل جمینگ و امکان بهبود کارایی به کمک الگوریتم های پردازشی جدید، اخیراً بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. منابع مختلف خطا که از جمله مهمترین آن ها تداخل موج پیوسته (CWI) می باشد، باعث خطا در ردیابی فاز سیگنال شده، که این عامل باعث خطا در اندازه گیری زمان ورود و در نهایت کاهش دقت ناوبری می شود. CWI را می توان بر حسب رابطه فرکانس آن با سیگنال لورن -C طبقه بندی کرد. معیارهای حداقل میزان کارایی، سه نوع CWI هم زمان، شبه هم زمان و غیرهم زمان را مشخص می کنند. بر اساس تحلیل ساختار لورن در حوزه زمان، در این مقاله یک روش جدید به منظور حذف تداخل مطرح شده است. زمانی که تداخل موج پیوسته ۱ کیلوهرتز تغییر می یابد، در حقیقت تاثیرات تداخل بر روی پالس های اول و سوم، هم زمان می شوند و فاز تداخل در شروع پالس اول و سوم یکسان می گردد، بنابراین الگوریتم پیشنهادی می تواند تداخل هایی که فرکانس

۸- مراجع

- Predictor,” [C]. Proc. Signal Processing Symposium, Norwegian, vol. 9, pp. 167-172, 1995.
- [17] D. Last and Y. Bian, “Carrier wave interference and Loran-C receiver performance,” [J]. Radar and Signal Processing, IEE Proceedings-F, vol. 140, no. 5, pp. 273-283. 2008.
- [18] D. Last and Y. Bian, “High-Efficiency Loran-C Interference Identification by Synchronous Sampling,” [J]. IEEE Transactions on aerospace and electronic systems, vol. 33, no. 1, pp. 134-141, 1997.
- [19] L. Wan-hong, X. Lei, and L. Xiao-qiu, “Analysis of carrier wave interference suppression in Loran-C receiver,” [J]. Ship electronic engineering, vol. 26, no. 5, pp. 77-79, 2006.
- [20] Z. Xin-li, M. Qing-ping, and L. Hua-qin, “Noise suppression technique in Loran-C receivers,” [J]. Journal of Chongqin University of science and technology, vol. 10, no. 1, pp. 82-87, 2008.
- [21] M. Beckman, “Carrier wave signals interfering with loran C,” Ph. D. thesis, Delft University Press, Delft, The Netherlands, 1992.
- [22] L. Fernand and L. Roux, “Estimation of loran C Sky waves Using Frequency Estimation Techniques,” Degree of Master of Science in Electrical Engineering, Department of Telecommunications and Signal Processing, Blekinge Institute of Technology, Sweden, 2003.
- [23] L. Manish, “Characterization of atmospheric noise and precipitation static in the Loran-C Band for aircraft,” master of science, thesis, Ohio University, 2004.
- [24] “Basic Guide to Advanced Navigation,” 2nd Edition, RTO Publication, Feb. 2010.
- [25] “2001 Federal Radio navigation Systems,” United States Department of Defense and Department of Transportation, DOT-VNTSC-RSPA-01-3.1 / DOD-4650.5, 2001.
- [26] “Loran capability to mitigate the impact of a GPS outage on GPS position, navigation and time applications,” Federal Aviation Administration, Tech. Rep., March 2004.
- [27] L. Tetley and D. Calcutt, “Electronic Navigation Systems,” Butterworth-Heinemann, 3rd Ed., 2001.
- [28] P. F. Swaszek, “Loran Phase Codes,” Revisited, Position, Location and Navigation Symposium, 2008.
- [29] C. O. Lee and J. Boyce, “Atmospheric Noise Mitigation for Loran,” Ph. D. thesis, Stanford University, Submitted to The Department of Aeronautics and Astronautics and The Committee on Graduate Studies of Stanford University,” March 2007.
- [30] “Specification of the Transmitted Loran C Signal,” U. S. Department of Transportation, United States Coast Guard, Washington, DC, Tech. Rep. COMDTINST M16562.4A, May 1994.
- [31] “Loran-C Engineering Course,” US Coast Guard Academy 1985.
- [32] “Minimum performance standards marine Loran-C receiving equipment, Radio technical Commission for Marine Services,” report of special committee 70, 1977.
- [33] Draft standard, “Loran-C receivers for ships,” IEC technical committee 80, 1989.
- [34] M. Beckmann, “Synchronous interference to Loran-C and its influence on cycle identification,” Proceedings of the 19th annual technical symposium, The Wild Goose Association, pp. 105-113, October 1990.
- [35] W. A. Gardner, “Cycle stationary in Communications and Signal processing,” IEEE Press, 1994.
- [1] M. Bayat , M. H. Madani, and S. M. J. Razavi, “A Combined Improved Algorithm to Estimating The Delay of Sky Waves in Loran C Receiver,” Journal of Electronical & Cyber Defence, vol. 2, no. 4, 2014.
- [2] A. Helwig, G. Offermans, C. Stout, and C. Schue, “Design and Performance of a Low Frequency Time and Frequency Dissemination Service,” UrsaNav Inc., FAA APNT Public Meeting, August 2013.
- [3] [2] A. Helwig, G. Offermans, C. Stout, C. Schue, B. Walker, T. Hardy, and K. Zwicker, “Low Frequency (LF) Solutions for Alternative Positioning, Navigation, Timing, and Data (APNT&D) and Associated Receiver Technology,” Proceedings of the ION International Technical Meeting (ITM), January 2011.
- [4] M. Narins, “Alternative Positioning, Navigation, and Timing Initiative: Assumptions and Requirements,” FAA APNT Public Meeting, August 2010.
- [5] US Coast Guard, “Cooperative Research and Development Agreement: Technology to Provide Wireless Precise Tim; Alternatives to Global Positioning Systems,” Docket No. USCG-2011-1167, Federal Register vol. 77, no. 7, January 2012.
- [6] Z. Lili, M. Zhonglin, P. Yurong, and X. Xiaoli, “Loran-C ground-wave propagation prediction based on adaptive moving window finite-difference time-domain method with compute unified device architecture parallel computing techniques,” IET Microwave Antennas Propagation, vol. 9, Iss. 5, pp. 413-422, 2015.
- [7] L. Wenying and C. Baixiao, “Low complexity sparse noise reduction method for Loran-C sky wave delay estimation,” IEEE Electronics Letters, vol. 49, pp. 1572-1574, November 2013.
- [8] L. Shifeng, W. Yulin, H. Yu, and Y. Jiangbin, “Loran-C signal fast acquisition method and its performance analysis,” Journal of Electronics & Information Technology, vol. 35, pp. 2175-2179, Sept. 2013.
- [9] M. bayat and M. H. Madani, “Navigation Accuracy Improvement Using a New Integrated Algorithm of TOA/TDOA in Ground-based Loran Systems,” Journal of Aeronautical Engineering, vol. 16, no. 2, 2015. (in persian)
- [10] L. P. Remmerswaal and D. Vanwilligen, “Some aspects of interference on Loran-C,” IEE Pruc. F, vol. 136, no. 3, pp. 109-117, 1989.
- [11] L. P. Remmerswaal and D. V. Willigen, “Interference and Loran-C: A European problem,” Proceedings of the 17th annual technical symposium, The Wild Goose Association, pp. 22-40, October 1988.
- [12] A. C. Debruin and D. V. Willigen, “Loran-C in a hostile environment,” Presented at Royal Institute of Navigation conference NAV88/2000, London, March 1988.
- [13] D. V. Willigen, “Hard Limiting and Sequential Detecting loran C Sensor,” Ph. D. thesis, Delft University Press, Delft, The Netherlands, 1985.
- [14] B. Widrow and S. D. Stearns, “Adaptive Signal Processing,” Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632, USA 1985, ISBN 0-13-004029 01.
- [15] W.-I. Tong, “Study of digital signal process in the front of the Loran-C receiver,” Xidian university, pp. 29-55, 2007.
- [16] K. H. Strom and T. Eltoft, “Cancelation of Continuous Wave Interferences in Loran-C Receivers using an Adaptive

- [38] P. R. Roth, "Effective Measuremetns Using Digital Signal Analysis," IEEE Spectrum, vol. 8, pp. 62-70, April 1971.
- [39] W. R. Hahn, "Optimum Signal Processing for Passive Sonar Range and Bearing Estimation," Journal of Acoustical Society of America, vol. 58, pp. 201-207, July 1975.
- [40] A. J. Fisher, "The Loran-c Cycle Identification problem," [http:// www.cs.york.ac.uk ftp dir /reports/ YCS-99-318.pdf](http://www.cs.york.ac.uk/ftp/dir/reports/YCS-99-318.pdf), 2011.
- [36] W. A. Gardner and C. -K. Chen, "Signal Selective Time - Difference - of - Arrival Estimation for Passive Location of Man - Made Signal Sources in Highly Corruptive Environments Part I: Theory and Method," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 40, no. 5, pp. 1168-1184, May 1992.
- [37] C. H. Knapp and G. C. Carter, "The Generalized Correlation Method for Estimation of Time Delay," IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, vol. ASSP-24, no. 4, pp. 320-327, August 1976.

A New Algorithm For Synchronous Continuous wave interference Cancellation In Loran Navigation System

M. Bayat, M. H. Madani*¹

*Malek Ashtar University of Technology

(Received: 27/12/2015, Accepted: 06/06/2016)

ABSTRACT

Recently, the use of the loran system in navigation has gained much attention respect to its jamming security and possibility of improving the performance using hardware and new algorithms. Various sources of the error, continuous wave interference as the main one, cause error in the phase tracing and consequently cause error in measuring the time of arrival which finally result in the accuracy of navigation. In this paper, using the structure of loran pulses in the time domain, a new algorithm is proposed in order to removing the continuous wave interference. This algorithm has low complexity, has better performance than the conventional scenario, and its implementation causes improving of performance and accuracy of navigation. The simulation results show that the performance of the proposed algorithm is approximately independent of SIR of the received signal, and the limiter factor is the SNR of the received signal only. The proposed algorithm for measuring the time of arrival (TOA) result in removing the effect of coherent interference (improvement compared to the other conventional scenario averaging and phase decoding with coefficient 10^{23}). This noticeable improvement is provided in the cost of decreasing the received SIR caused by the non-coherent continuous wave interference with maximum value 3 dB which can be simply removed by use of a band pass filter.

Keywords: Loran C, SIR, CWI, GRI, TOA, TDOA

* Corresponding Author Email: Mh_madani@aut.ac.ir