

طراحی و شبیه‌سازی یک سامانه تطبیقی خطی به منظور حذف تداخل موج پیوسته در گیرنده سامانه ناوبری لورن

میثم بیات^{۱*}، محمدحسین مدنی^۲

۱- استادیار، دانشگاه هوایی شهید ستاری، ۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران

(دریافت: ۹۶/۰۱/۱۳، پذیرش: ۹۶/۰۸/۳۰)

چکیده

استفاده از سامانه لورن، به دلیل مصونیت در مقابل جمینگ و قابلیت نفوذ به مکان‌های مسقف یک روش پدافندی مقاوم برای ناوبری است. این سامانه به عنوان یک سامانه کمک ناوبری، به ویژه در زمان بحران و قطع GPS توانایی ناوبری را به طور مستقل دارد. منابع مختلف خطا که از جمله مهم‌ترین آن‌ها تداخل موج پیوسته (CWI) است، باعث خطا در ردیابی فاز سیگنال شده، که این عامل باعث خطا در اندازه‌گیری زمان ورود و در نهایت کاهش دقت ناوبری می‌شود. در این مقاله به ارائه یک روش جدید برای حذف تداخل موج پیوسته در گیرنده سامانه ناوبری لورن با استفاده از الگوریتم تطبیقی خطی پرداخته شده است. نوآوری خاص این مقاله در تحلیل سیگنال لورن و به دست آوردن میزان تأخیر مورد نیاز برای انتخاب ورودی‌های مناسب در فیلتر تطبیقی است. فیلتر تطبیقی مورد استفاده، یک فیلتر تطبیقی پرکاربرد و مناسب در کاربردهای عملی است. بزرگ‌ترین مزیت روش پیشنهادی عدم نیاز به شناخت فرکانس‌های تداخلی و توزیع فرکانسی سیگنال‌های تداخلی است. سامانه پیشنهادی به صورت خودکار فرکانس‌های تداخلی را در ورودی به دست آورده و حذف می‌نماید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد پس از اعمال الگوریتم پیشنهادی، نسبت SIR خروجی به SIR ورودی، بسته به مقدار SIR در ورودی ۳۶ الی ۸۰ دسی‌بل بهبود می‌یابد. همچنین هر تکرار از الگوریتم پیشنهادی نیازمند $3N+1$ عملگر ضرب است (N تعداد وزن‌های فیلتر تطبیقی است)، و بدون هیچ‌گونه محدودیت سخت‌افزاری و بار محاسباتی قابل پیاده‌سازی است.

کلیدواژه‌ها: سامانه لورن، تداخل CWI، گیرنده لورن C، سامانه تطبیقی، فرکانس تداخلی

Design and Simulation of a Linear Adaptive System to Remove the CWI in Loran Navigation System Receivers

M. Bayat*, M. H. Madani

Shahid Sattari Aeronautical University
(Received: 02/04/2017; Accepted: 21/11/2017)

Abstract

The use of Loran system is a strong defence method for navigation due to its immunity against jamming and ability to penetrate indoor locations. This system can be used as a navigation aid system especially in times of crisis and GPS disconnection. Continuous Wave Interference (CWI) is one of the most important noise sources that make errors in signal phase tracking. Consequently, undesirable errors are constructed in time of arrival (TOA) measurement and ultimately navigation precision is reduced dramatically. In this paper, a new method is proposed in order to eliminate the CWI in Loran navigation system using linear adaptive algorithm. The specific innovation of this study is analyzing of Loran signal and obtaining the required delay to adopt the appropriate inputs in the adaptive filter. The used adaptive filter is the most relevant one in practical applications. The greatest advantage of the proposed method is that it does not require knowledge of interference frequencies and frequency distribution. The proposed system is automatically obtained and eliminates interference frequency at the input. The simulation results show that the proposed algorithm provides a tremendous improvement in the SIR input. After applying the proposed algorithm, ratio of output to input of SIR, depending on the amount of SIR at the entrance of 36 to 80 dB is improved. Each iteration of the algorithm requires multiplication operator is $3N+1$ (N number of adaptive filter weights), and without any restrictions implemented hardware and computational time.

Keywords: Loran System, CWI, Phase Tracing, Adaptive System, Interference Frequency, SIR

* Corresponding Author E-mail: meysam.bayat302@gmail.com

۱. مقدمه

طیف فرکانسی CWI شامل طیف گسسته خطی است. با توجه به این مفهوم، سیگنال CWI به صورت دسته‌ای از موج سینوسی خالص با فرکانس‌های مشخص و همچنین دامنه‌های متفاوت مدل می‌شود [۱۶]. در گیرنده لورن-C سیگنال وارد شونده، ابتدا وارد فیلتر میان‌گذر می‌شود. گیرنده لورن C استاندارد از فیلتر میان‌گذر برای حذف CWI غیر هم‌زمان استفاده می‌نماید، اما این فیلتر دو نوع دیگر را نمی‌تواند حذف کند. پهنای باند این فیلتر بسته به نوع آن بین ۱۵ الی ۴۰ کیلوهرتز است. فرکانس مرکزی این فیلتر روی فرکانس حامل ۱۰۰ KHz قرار دارد [۱۵ و ۱۷]. رمزگذاری فاز [۱۸ و ۱۹] و میانگین‌گیری [۱۵] و [۲۰] بر روی CWI هم‌زمان و شبه هم‌زمان تأثیرگذار است و باعث کاهش تداخل‌های هم‌زمان و غیر هم‌زمان می‌شود.

هدف از این مقاله ارائه یک روش جدید برای حذف تداخل موج پیوسته در گیرنده لورن C با به‌کارگیری الگوریتم تطبیقی است و با استفاده از الگوریتم NLMS^۵ انجام می‌شود. بزرگ‌ترین مزیت روش پیشنهادی عدم نیاز به اطلاعات اولویت داری از توزیع فرکانسی سیگنال تداخلی است. نتیجه نهایی سامانه‌ای است که به صورت خودکار تداخل با فرکانس‌های نامعلوم را در ورودی به دست می‌آورد. این سامانه از یک نسخه تأخیر یافته سیگنال مطلوب به عنوان ورودی فیلتر تطبیقی استفاده می‌کند، اثر سامانه مانند چند فیلتر ناچ قابل تنظیم است. ناچ‌ها دقیقاً در فرکانس‌های منابع تداخل که در سیگنال ورودی وجود دارد، قرار می‌گیرند. بنابراین هر تغییری در فرکانس و فاز سیگنال‌های تداخلی به سرعت توسط سامانه اصلاح می‌شود. در نتیجه منابع تداخل جدید که ممکن است در حین عملیات رخ دهد، توسط ایجاد ناچ‌های قابل تنظیم جدید حذف خواهند شد. بنابراین روش پیشنهادی یک راه حل ساده و کارآمد برای حذف مشکل تداخل موج پیوسته است، بدون اینکه نیازی به هیچ اطلاعاتی از پارامترهای منبع تداخل محلی داشته باشد.

در ادامه و در بخش ۲ ابتدا به معرفی سامانه ناوبری لورن و نحوه انتشار سیگنال آن پرداخته شده است. در بخش ۳ به بررسی تأثیرات CWI بر روی گیرنده لورن C پرداخته شده و سپس در بخش ۴ یک روش پیشنهادی بر مبنای الگوریتم‌های تطبیقی برای حذف CWI به منظور بهبود کارایی و افزایش دقت تخمین زمان ورود ارائه شده است. در بخش ۵ این الگوریتم برای سیگنال لورن دریافتی که با CWI آغشته شده است شبیه‌سازی شده و میزان بهبود سیگنال به تداخل در خروجی مشخص گردیده است. در پایان، نتیجه‌گیری از تحلیل‌های صورت گرفته انجام شده است.

سامانه ناوبری لورن^۱ یک سامانه ناوبری رادیویی زمینی با برد زیاد است و طراحی آن با استفاده از ایستگاه‌های زمینی است که به صورت زنجیره‌ای سازمان‌دهی شده‌اند. سامانه لورن C در طیف فرکانس رادیویی ۹۰-۱۱۰ KHz عمل می‌کند [۴-۱]. در سال‌های اخیر استفاده از سامانه لورن در ناوبری، به دلیل مصونیت در مقابل جنگ الکترونیک و قابلیت نفوذ به مکان‌های مسقف و دره‌ها به عنوان یک روش پدافندی مقاوم برای ناوبری بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [۱۳-۱۵]. فرستنده‌های سامانه لورن C دارای قدرت بالایی هستند، بنابراین سیگنال‌های رسیده به گیرنده دارای توانی چند برابر توان سیگنال دریافتی توسط گیرنده‌های سامانه‌های ماهواره‌ای است [۲-۱]. انتشار سیگنال در فرکانس‌های پایین به ویژه با توان‌های بالا، نیاز به آنتن‌های بزرگی دارد. بنابراین جیمینگ روی سیگنال‌های لورن C در غیر از محدوده‌های کوچک بسیار مشکل است [۷]. مهم‌ترین عامل خطا در سامانه‌های لورن، تداخل موج پیوسته^۲ با امواج زمینی است.

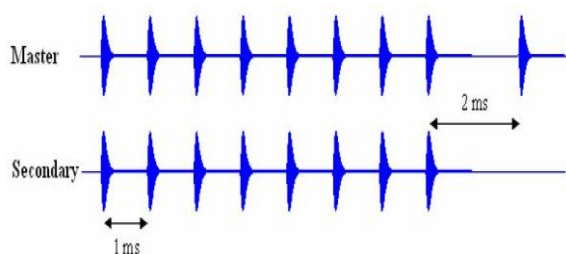
CWI و برخی از سیگنال‌های مزاحم دقت اندازه‌گیری زمان رسیدن سیگنال امواج زمینی را پایین می‌آورند. CWI سبب ایجاد خطاهایی در اندازه‌گیری TOA^۳ (زمان ورود) می‌شود، چرا که بر روی ردیابی فاز تأثیر می‌گذارد. همچنین ممکن است سبب گزینش چرخه نادرست شود که در این صورت منجر به حداقل ۱۰ میکروثانیه خطای زمان‌بندی در اندازه‌گیری TOA می‌شود [۶]. گیرنده‌های لورن-C را می‌توان در محیط‌های پر اختلال به‌کار برد. مشکل استخراج اطلاعات مربوط به تعیین موقعیت از اندازه‌گیری‌های زمان ورود (TOA) که تحت تأثیر تداخل قرار گرفته‌اند، در رأس تلاش‌های طراحان سامانه لورن C و سازندگان گیرنده قرار گرفته است. CWI بر حسب رابطه فرکانس آن با سیگنال لورن-C طبقه‌بندی می‌شود [۱]. معیارهای حداقل میزان کارایی (MPS)^۴، سه نوع CWI هم‌زمان، شبه هم‌زمان و غیر هم‌زمان را مشخص می‌کنند [۶]. این نوع از تداخل‌های موج حامل خطاهایی با ویژگی‌های مختلف را ایجاد می‌کنند. CWI هم‌زمان سبب ایجاد یک جابه‌جایی ثابت در اندازه‌گیری TOA می‌شود، CWI شبه هم‌زمان سبب ایجاد یک جابه‌جایی نوسانی شده و CWI غیر هم‌زمان نیز سبب یک جابه‌جایی شبیه به نویز می‌شود [۱۴]. تحقیقات نشان می‌دهد، CWI هم‌زمان و شبه هم‌زمان اغلب سبب ایجاد خطاهای غیرقابل قبولی در گیرنده شده و پوشش سامانه‌های لورن-C را کاهش می‌دهند [۱۵].

^۱ Long Range Navigation^۲ Continuous Wave Interference^۳ Time of Arrival^۴ Minimum Performance Standards^۵ Normalize Least Mean Square

۲. سامانه ناوبری زمین‌پایه لورن

زمان‌بندی دقیق سیگنال‌های ارسالی انتخاب شده است. ایستگاه‌های ثانویه فقط ۸ پالس ارسال می‌نمایند که این پالس‌ها با فاصله زمانی $1000 \mu\text{Sec}$ از یکدیگر قرار دارند. اختلاف در تعداد پالس‌ها به علاوه دیگر مشخصات سیگنال باعث می‌شود 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^۲) نامیده می‌شود.

شکل (۲) 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 [۲۳-۲۵].



شکل ۲. الگوهای زمانی پالس ایستگاه‌های اصلی و ثانویه [۱]

در داخل هر گروه پالسی، هر پالس با یک فاز حامل که صفر درجه (کد فاز مثبت) و یا 180° 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 به عنوان کدینگ فاز شناخته می‌شود. بنابراین یک دنباله دقیقی از پالس‌ها هر دو برابر بازه تکرار گروهی یک بار تکرار می‌شوند. به عبارت دیگر سیگنال لورن، متناوب با دوره تناوب دو برابر بازه تکرار گروهی است. این دوره تناوب در اصطلاح بازه کد فاز^۳ نامیده می‌شود [۲۳ و ۲۶]. 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 [۲۷]. فرم ریاضی یک پالس لورن استاندارد در زیر آورده شده است [۲۸ و ۲۹]:

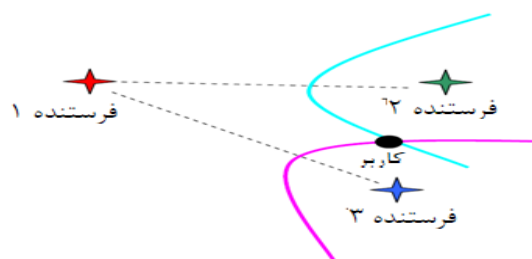
$$i(t) = A(t-\tau)^2 \exp\left(-2\left(\frac{t-\tau}{65}\right)\right) \sin(\omega t + \phi), \quad \text{for } \tau \leq t \leq \tau + 65 \quad (1)$$

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

در رابطه (۱)، A جریان مربوط به پیک جریان (بر حسب آمپر)، t زمان (بر حسب میکروثانیه)، ϕ : کد فاز (بر حسب رادیان) که صفر برای کد فاز مثبت و π برای کد فاز منفی است،

سامانه لورن C یک سامانه رادیونابری زمین‌پایه است که در طیف فرکانس رادیویی ۹۰-۱۱۰ 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. [۱ و ۲۱]. این سامانه می‌تواند به عنوان یک پشتیبان مستقل سامانه موقعیت‌یاب جهانی عمل کند. 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 [۱ و ۲۲].

به طور 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 M و بقیه فرستنده‌ها به عنوان ایستگاه‌های ثانویه و با علامت‌های X, W, V, Y و Z مشخص می‌شوند [۱]. 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. فصل مشترک دو یا چند خط مکان‌یاب هذلولوی که توسط دو یا چند اندازه‌گیری اختلاف زمانی ایجاد می‌شود، مکان گیرنده را تعریف می‌کند (شکل (۱)).



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)). به طور خلاصه سیگنال ارسالی شامل گروهی از پالس‌ها است. سیگنال ارسالی از فرستنده اصلی دارای ۹ پالس (۸ پالس با فاصله $1000 \mu\text{sec}$ و آخری با فاصله $2000 \mu\text{sec}$) است. ارسال به صورت پالس به دلیل کاهش دادن توان مورد نیاز ارسالی، سهولت تشخیص سیگنال و

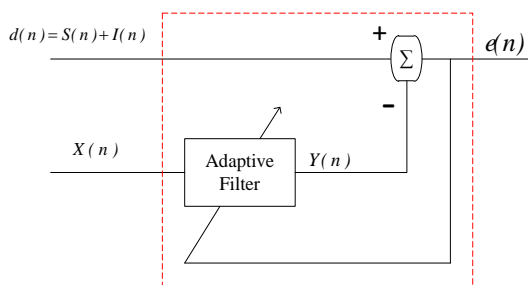
^۲ Group Repetition Interval

^۳ Phase Code Interval

^۱ Line of Sight

در این سامانه محاسبه سیگنال خطا بر مبنای تخمینی از وزن‌های فیلتر است که در هر گام به‌روزرسانی می‌شود. این به‌روزرسانی بر اساس هر یک از الگوریتم‌های تطبیقی قابل اجرا است، اما با توجه به اینکه الگوریتم NLMS مناسب‌ترین الگوریتم برای پیاده‌سازی عملی است و پیچیدگی پایینی دارد در اینجا استفاده شده است.

انتخاب $x(n)$ و $d(n)$ مناسب برای شکل (۴)، مهم‌ترین قسمت اجرای این الگوریتم برای کاربردهای گوناگون است. در ادامه با توجه به مفاهیم الگوریتم تطبیقی که بر اساس حداقل کردن مربعات خطا ضرایب خود را به‌روزرسانی می‌نماید، ورودی‌های مناسب برای $x(n)$ و $d(n)$ انتخاب می‌شود.



شکل ۴. سامانه تطبیقی حذف تداخل

۴-۱. طراحی سامانه تطبیقی حذف تداخل

فیلترهای تطبیقی ضرایب خود را بر اساس حداقل نمودن متوسط مجذور خطا یعنی $E\{e(n)^2\}$ به‌روزرسانی می‌نمایند. با فرض اینکه پالس لورن گسسته را با $S(n)$ و تداخل موج پیوسته که شامل حاصل جمع سینوسی‌ها با دامنه و فازهای تصادفی است، را با $I(n)$ نمایش داده می‌شود، بنابراین با فرض ورودی $d(n)$ فیلتر به صورت $d(n) = S(n) + I(n)$ دارید:

$$e(n) = S(n) + I(n) - Y(n) \quad (2)$$

بنابراین دارید:

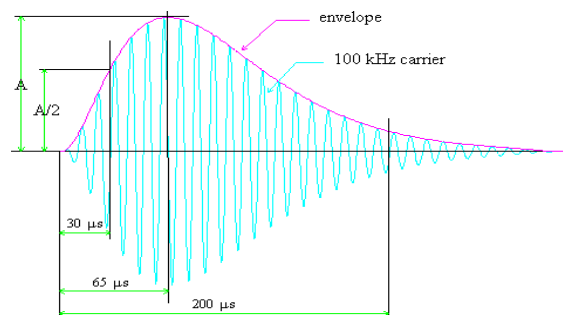
$$\begin{aligned} (e(n))^2 &= (S(n) + I(n) - Y(n))^2 \\ &= (S(n))^2 + (I(n) - Y(n))^2 \\ &\quad + 2S(n)[I(n) - Y(n)] \end{aligned} \quad (3)$$

پس متوسط مجذور خطا به صورت معادله زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} E\{e(n)^2\} &= E\{(S(n) + I(n) - Y(n))^2\} \\ &= E\{(S(n))^2\} + E\{(I(n) - Y(n))^2\} \\ &\quad + 2E\{S(n)[I(n) - Y(n)]\} \end{aligned} \quad (4)$$

با توجه به اینکه منبع تداخل و منبع سیگنال مستقل از هم هستند و تغییر در تداخل هیچ اثری بر روی سیگنال نمی‌گذارد، بنابراین تابع PDF مشترک آن‌ها همواره صفر است و به همین

τ تفاضل پوش از سیکل^۱ (بر حسب میکروثانیه) و ω فرکانس حامل $(0.2\pi \text{ rad}/\mu\text{s})$ است. در شکل (۳)، یک پالس لورن استاندارد با کد فاز صفر نشان داده شده است.



شکل ۳. ساختار پالس لورن [۱]

۳. تأثیرات تداخل CWI بر روی گیرنده لورن C

CWI می‌تواند زمان تقاطع صفر مورد اندازه‌گیری را تغییر دهد، این خطای زمانی تابعی از نسبت سیگنال به تداخل (SIR) و فاز عامل تداخلی مربوط به آن چرخه از لورن C است [۱].

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 جهش موجود در ۲GRI برابر خواهند بود. میانگین‌گیری از اندازه‌گیری‌های انجام شده نیز تغییری ایجاد نخواهد کرد. با کد کردن فاز، تغییر جهت‌های پالس‌های 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 ۲GRI، 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 ۱۲ dB است. به طور کلی، کاهش تأثیرات ناشی از CWI که به واسطه کد کردن فاز ایجاد می‌شود، بر حسب فرکانس و به گونه‌ای پیچیده متغیر است [۳۰].

۴. سامانه تطبیقی پیشنهادی

در این قسمت اصول پایه سامانه تطبیقی حذف‌کننده تداخل توضیح داده می‌شود. سامانه بر مبنای دو مؤلفه زیر است:

- لورن-C یک سامانه پالسی است که فرکانس تکرار پالس‌ها یک کیلوهرتز است.

- اندازه‌گیری‌های TOA در سامانه لورن-C بر مبنای شناختن مکان عبور از صفر موج حامل است که کمتر از ۳۵ میکروثانیه (از ابتدای پالس ورودی) است.

¹ Envelope to Cycle Difference

گونه‌ای است که فقط شامل تداخل است. با توجه به اینکه
 $E\{S(n)I(n)\} = 0$ است، بنابراین باز هم امید ریاضی
 $E\{S(n)S(n-k)\} = 0$ یعنی هیچ‌گاه پالس‌های این دو حالت با
 هم همپوشانی نخواهد داشت.

و بنابراین در این حالت هم‌بستگی برابر با صفر است:

$$E\{S(n)(S(n-k))\} = 0 \quad (10)$$

بنابراین اگر ورودی $d(n) = S(n) + I(n)$ در نظر گرفته
 شود آنگاه برای $x(n)$ می‌توان یک تأخیر به اندازه k_0 از $d(n)$ را
 در نظر گرفت. بنابراین خواهید داشت:

$$Y(n) = \sum_{k=1}^P W(k)d(n-k-k_0) \\ = \sum_{k=1}^P W(k)[S(n-k-k_0) + I(n-k-k_0)] \quad (11)$$

و

$$E\{S(n)Y(n)\} = E\{S(n)\sum_{k=1}^P W(k)(S(n-k-k_0))\} \\ + E\left\{S(n)\sum_{k=1}^P W(k)I(n-k-k_0)\right\} = 0 \quad (12)$$

بنابراین با این انتخاب برای ورودی، مقدار متوسط مجذور خطا به
 صورت زیر به دست می‌آید:

$$E\{(e(n))^2\} = E\{(S(n))^2\} + E\{(I(n)-Y(n))^2\} \quad (13)$$

چون به‌روزرسانی وزن‌های فیلتر به نحوی است که سعی در
 حداقل کردن رابطه بالا را دارد پس دو رشته تصادفی $I(n)$ و $Y(n)$
 به مفهوم ms متقارب هستند و با نماد $I(n) \xrightarrow{ms} Y(n)$ نمایش داده
 می‌شود. لازم به ذکر است که از تقارب به مفهوم ms می‌توان
 تقارب در احتمال را نتیجه گرفت و زمانی که این نوع از تقارب
 مطرح باشد می‌توان گفت که با احتمال ۱ از یک شماره‌ای به بعد
 اختلاف اعداد رشته‌های تصادفی با مقدار حدی کوچک‌تر از ϵ به
 هم همگرا هستند. بنابراین:

$$E\{(I(n)-Y(n))^2\} \rightarrow 0 \Rightarrow \left(I(n) \xrightarrow{ms} Y(n)\right), e(n) \approx S(n) \quad (14)$$

با توجه به تحلیل فوق با انتخاب ورودی‌های مناسب، خروجی
 $e(n)$ فیلتر تطبیقی تنها حاوی سیگنال لورن خواهد بود و چون
 دنباله $(I(n)-Y(n))$ متقارب به سمت صفر است و دقیقاً صفر
 نیست، مقداری از CWI حذف نشده باقی خواهد ماند. مقدار این
 تداخل باقی‌مانده تابعی از SIR ورودی و اندازه گام فیلتر و
 همچنین تعداد ضرایب فیلتر است.

دلیل هم‌بستگی بین $I(n)$ و $S(n)$ صفر است. از طرفی چون
 تداخل $I(n)$ به صورت مجموعه‌ای از سینوسی‌ها با دامنه و فازهای
 تصادفی در نظر گرفته شده است که دامنه‌ها مستقل از فازهای
 سینوسی‌ها هستند، بنابراین مدل تداخل به صورت زیر است:

$$I(n) = \sum A_i \sin(fn + B_i) \quad (5)$$

و همواره در سامانه‌های مخابراتی چون فاز سیگنال رسیده با
 احتمال یکسان می‌تواند هر مقداری را بین بازه $[0:2\pi]$ داشته
 باشد، بنابراین بهترین توزیع برای آن توزیع یکنواخت است، پس
 دارید:

$$P(B_i) = U[0:2\pi] = \begin{cases} 1/2\pi & 0 \leq B_i \leq 2\pi \\ 0 & \text{Other} \end{cases} \quad (6)$$

با توجه به خاصیت خطی و استقلال A_i با B_i دارید:

$$E(I(n)) = E\left(\sum A_i \sin(fn + B_i)\right) \\ = \sum E(A_i \sin(fn + B_i)) \\ = \sum E(A_i) \times E(\sin(fn + B_i)) \\ = \sum E(A_i) \int_{-\infty}^{\infty} \sin(fn + \alpha_i) P(\alpha_i) d\alpha_i \\ = \sum E(A_i) \int_0^{2\pi} \sin(fn + \alpha_i) * 1/2\pi = 0 \quad (7)$$

بنابراین

$$E\{S(n)(I(n))\} = E(S(n)) E(I(n)) = 0$$

بنابراین

$$E\{S(n)[I(n) - Y(n)]\} \\ = E\{(S(n)I(n))\} - E\{(S(n)Y(n))\} \\ = -E\{(S(n)Y(n))\} \quad (8)$$

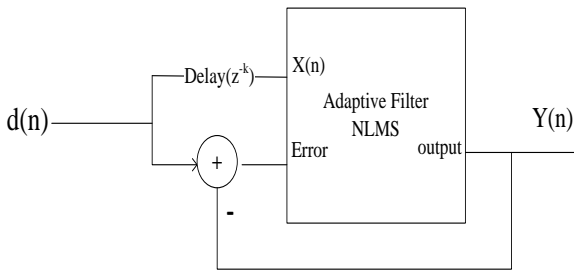
پس

$$E\{(e(n))^2\} = E\{(S(n))^2\} + E\{(I(n)-Y(n))^2\} - 2E\{S(n)Y(n)\} \quad (9)$$

عملکرد الگوریتم تطبیقی برای تطبیق وزن‌های فیلتر به گونه‌ای
 است که در خروجی فیلتر $\{e(n)\}^2$ به حداقل برسد. از
 طرفی با توجه به دنباله پالس‌های سیگنال لورن، عرض هر پالس
 لورن 250 میکروثانیه و فاصله بین دو پالس متوالی 1000
 میکروثانیه است. پس اگر سیگنال لورن را $S(n)$ در نظر گرفته
 شود، می‌توان گفت $S(n)$ با $S(n-k)$ به شرطی که $k > k_0$ باشد، که
 $750 < k_0 < 250$ میکروثانیه است، ناهمبسته هستند. (وقتی که
 $S(n)$ از نظر زمانی، روی پالس قرار دارد، به دلیل اینکه k حداقل
 به اندازه طول پالس است، بنابراین $S(n-k)$ از نظر زمانی به

۴-۳. نحوه عملکرد سامانه

در شکل (۵) عملکرد سامانه تطبیقی نشان داده شده است. سیگنال دریافتی نمونه‌برداری شده و به دو شاخه تقسیم می‌شود. مسیر پایینی، سیگنال مطلوب (dn) را مشخص می‌کند که همان سیگنال دریافتی است و مسیر بالا ورودی فیلتر تطبیقی (x(n)) است که یک نسخه تأخیر یافته از سیگنال دریافتی است.



شکل ۵. سامانه تطبیقی حذف تداخل طراحی شده

در ادامه فیلتر تطبیقی با اندازه گام بهینه، برای سیگنال لورن که به تداخل سینوسی با دامنه‌های بزرگ و فرکانس‌های متفاوت و نزدیک پهنای باند کاری لورن آغشته شده است، به کاررفته و نتایج شبیه‌سازی نشان داده می‌شود.

بنابراین در این حالت اگر کدینگ فاز در دو نصفه مجزا متعادل بود، b_0 تا b_7 و b_8 تا b_{15} ، آنگاه d_n برابر صفر می‌شد. به بیان دیگر در این حالت تمامی خطوط مربوط به معکوس بزرگ‌ترین مقسوم‌علیه مشترک دو زنجیره که مضرب‌های صحیحی از ۵ کیلوهرتز هستند، متناظر با $n=5m*PCI/1000$ حذف می‌شد. اما دوره کدینگ فاز کنونی لورن این ویژگی را ندارد و مقداری از تداخل حتی پس از استفاده از فیلتر بالا باقی می‌ماند.

۵. نتایج شبیه‌سازی

در این بخش با استفاده از شبیه‌سازی‌های انجام شده عملکرد سامانه حذف تداخل موج پیوسته طراحی شده برای سامانه لورن توضیح داده می‌شود. مراحل انجام شبیه‌سازی شامل سه بخش است. در بخش اول دنباله‌ای از پالس لورن به اضافه تداخل و نویز جمعی ناهمبسته تولید و با هم ترکیب می‌شوند. بخش دوم، بلوک تولید ورودی‌های مناسب برای سامانه طراحی شده است. در این بخش سیگنال مطلوب (dn) که در واقع سیگنال دریافتی قبل از حذف تداخل است و ورودی فیلتر تطبیقی (x(n))، که یک نسخه تأخیر یافته از سیگنال دریافتی است، تولید می‌شود. بخش سوم شامل شبیه‌سازی الگوریتم تطبیقی مورد استفاده به منظور به‌روزرسانی وزن‌های فیلتر است. در الگوریتم استفاده شده، اندازه

۴-۲. الگوریتم NLMS

الگوریتم NLMS تعمیم‌یافته الگوریتم LMS است که به وسیله انتخاب اندازه گام‌های متفاوت برای هر تکرار، به‌روزرسانی ضرایب را انجام می‌دهد. این ضرایب، تقریبی از معکوس مجموع انرژی انتظاری از مقادیر آنی ضرایب بردار ورودی x(n) است. در این صورت تریس ماتریس R به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۱]:

$$tr[R] = \sum_{i=0}^{N-1} E[x^2(n-i)] = E\left[\sum_{i=0}^{N-1} x^2(n-i)\right] \quad (15)$$

مقدار $w(n+1)$ نیز از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$w(n+1) = w(n) + \frac{1}{x^T(n)x(n)} e(n)x(n) \quad (16)$$

در این الگوریتم یک اندازه گام متغیر با نام $\mu(n)$ در محدوده $0 < \mu(n) < 2$ انتخاب شده و مقدار خطای $e^+(n)$ با استفاده از به‌روز کردن $w(n+1)$ بر اساس روابط زیر حداقل می‌شود [۳۲]:

$$\begin{aligned} w(n+1) &= w(n) + 2\mu(n)e(n)x(n) \\ e^+(n) &= d(n) - w^T(n)x(n) \\ &= (1 - 2\mu(n)x^T(n)x(n))e(n) \end{aligned} \quad (17)$$

سپس با توجه به روابط زیر، سعی بر حداقل نمودن $(e^+(n))^2$ داشته و به این واسطه می‌توان مقداری برای $\mu(n)$ پیدا کرد که $e^+(n)$ را به سمت صفر سوق دهد.

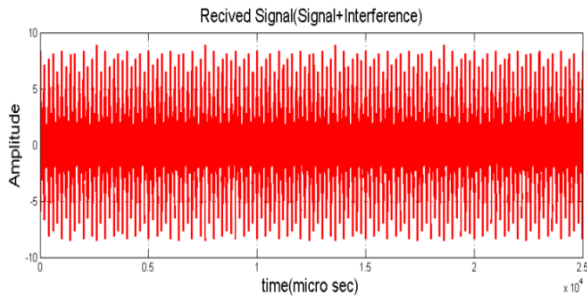
$$\mu(n) = \frac{1}{2x^T(n)x(n)} \quad (18)$$

در این صورت می‌توان گفت:

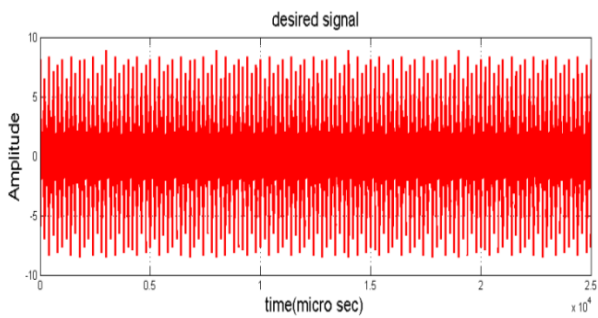
$$\begin{aligned} w(n+1) &= w(n) + 2\mu(n)e(n)x(n) \\ w(n+1) &= w(n) + \frac{1}{x^T(n)x(n)} e(n)x(n) \end{aligned} \quad (19)$$

برای جلوگیری از واگرا شدن این الگوریتم می‌توان یک مقدار ثابت (ϵ) به مخرج رابطه فوق اضافه کرده تا مخرج آن هیچ‌گاه صفر نگردد و باعث واگرایی الگوریتم NLMS نشود. البته لازم به ذکر است که افزودن (ϵ) به مخرج رابطه فوق باعث کاهش مقدار ERLE می‌شود [۳۳]. در واقع سامانه حذف تداخل نمی‌تواند آکو یا تداخل را به طور کامل حذف نماید و مقداری از آن در خروجی ظاهر می‌گردد. ERLE به عنوان یک معیار برای مشخص شدن نحوه عملکرد یک فیلتر و مقایسه فیلترهای تطبیقی در توانایی آن‌ها در حذف تداخل به کار می‌رود. هر قدر مقدار ERLE زیاد باشد به این مفهوم است که تداخل کمتری در خروجی سامانه باقی خواهد ماند.

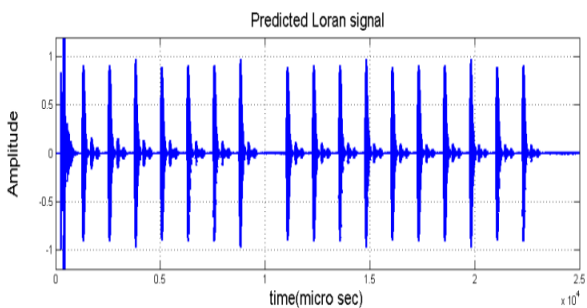
به کندی همگرا شده، اما بعد از اینکه همگرایی صورت گرفت پالس‌های لورن به وضوح قابل‌شناسایی هستند. چون μ کوچک است، سامانه به کندی همگرا شده است و به همین دلیل پالس اول لورن از بین رفته است. سامانه در حین مدت زمان کوتاه هر پالس، از پالس‌های لورن C آگاهی ندارد و توسط فرآیند فیلترینگ تطبیقی تقریباً سیگنال بدون تداخل باقی می‌ماند.



شکل ۷. سیگنال دریافتی (سیگنال به اضافه تداخل)



شکل ۸. سیگنال ورودی فیلتر تطبیقی $(x(n))$

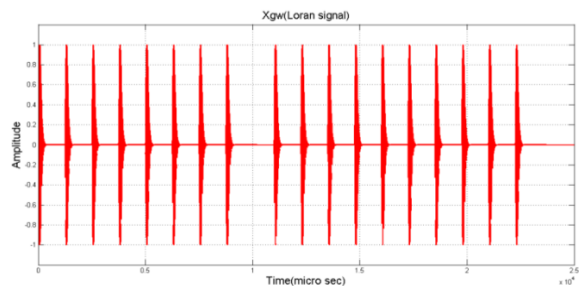


شکل ۹. خروجی فیلتر تطبیقی

برای مقایسه بهتر سیگنال ارسال شده بدون تداخل با خروجی سامانه تطبیقی هر دو دنباله روی یک نمودار در قسمت الف شکل (۱۰) آورده شده است. به منظور بررسی میزان دقت عملکرد سامانه طراحی شده پس از همگرایی، در قسمت (ب) خروجی سامانه در طول زمان یک پالس (پالس چهارم قسمت الف) نمایش داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود خروجی سامانه کاملاً منطبق بر پالس ارسالی است و زمان ورود پالس بدون هیچ‌گونه خطای ناشی از تداخل به دست می‌آید.

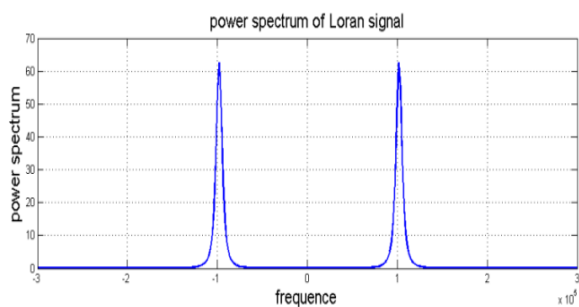
گام μ نرخ تطبیق الگوریتم‌های مختلف را کنترل می‌کند. انتخاب اندازه گام مهم بوده و شبیه‌سازی‌های مختلف، اطلاعاتی درباره اثر μ در فرآیند تطبیق را نشان می‌دهد.

سامانه تطبیقی با اندازه گام $\mu = 0.1$ ، برای سیگنال ورودی (دنباله‌ای از پالس‌های لورن C، یک سیگنال تداخل موج پیوسته شامل ۱۱ سیگنال سینوسی با فرکانس‌های ۷۰، ۷۴، ۷۷، ۸۰، ۸۵، ۸۷، ۹۰، ۹۵، ۹۸، ۱۰۳ و ۱۱۰ کیلوهرتز) و تعداد ضرایب فیلتر ۲۵۰ و $SIR = -28$ dB و نویز جمعی ناهمبسته با $SNR = 12$ dB اجرا می‌شود. شبیه‌سازی نشان می‌دهد هنگامی که تعداد سینوسی‌ها در سیگنال تداخل موج پیوسته افزایش می‌یابد، برای ادامه روند حذف سیگنال تداخل موج پیوسته، تعداد وزن‌ها در فیلتر تطبیقی نیز باید افزایش یابد. برای یک سیگنال تداخل موج پیوسته که شامل ۲۰ سینوسی قوی است، تعداد وزن‌ها باید در حدود ۳۰۰ باشد. در شکل‌های (۶) تا (۱۷) صحت الگوریتم پیشنهادی با استفاده از نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده است. در شکل (۶) دنباله پالس لورن استاندارد که در واقع همان سیگنال ارسالی از فرستنده‌ها است نشان داده شده است.

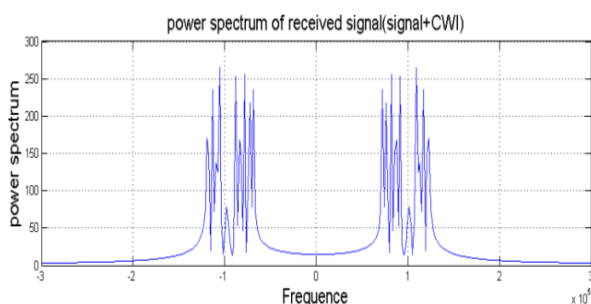


شکل ۶. سیگنال لورن استاندارد

شکل (۷) سیگنال دریافتی در گیرنده که شامل دنباله‌ای از پالس لورن به اضافه تداخل و نویز جمعی ناهمبسته است و به عنوان سیگنال مطلوب در سامانه حذف تداخل به کار می‌رود را نشان می‌دهد. با استفاده از این سیگنال و اعمال سامانه حذف تداخل، پالس‌های لورن آشکار می‌شوند. در شکل (۸) سیگنال ورودی فیلتر تطبیقی $(x(n))$ ، که یک نسخه تأخیر یافته از سیگنال دریافتی است، نشان داده شده است. در شکل (۹) خروجی سامانه تطبیقی دیده می‌شود. همان‌گونه که از شکل مشخص است، سامانه تطبیقی طراحی شده به راحتی و بدون هیچ‌گونه اطلاعی از دامنه یا فرکانس‌های تداخلی قادر به حذف آن‌ها بوده است. فرآیند به کندی همگرا شده، اما بعد از اینکه همگرایی صورت گرفت، پالس‌های لورن به وضوح قابل‌شناسایی هستند. اگر اندازه گام کوچک انتخاب شود، فرآیند

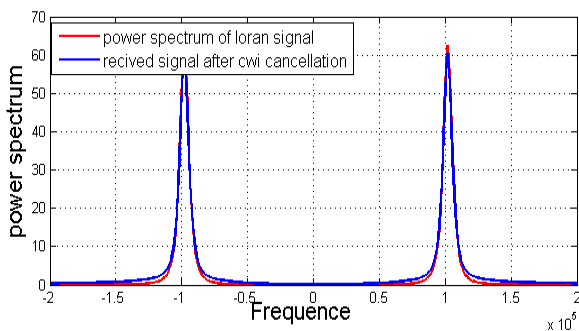


شکل ۱۲. طیف توان سیگنال لورن استاندارد

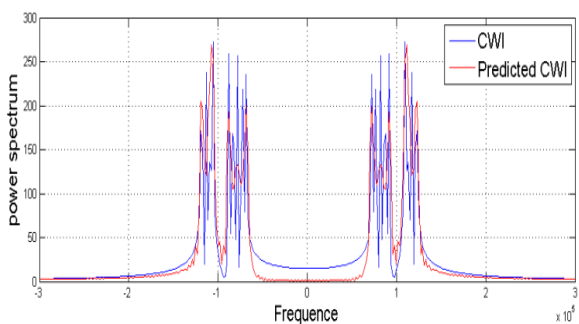


شکل ۱۳. طیف توان سیگنال دریافتی قبل از حذف تداخل

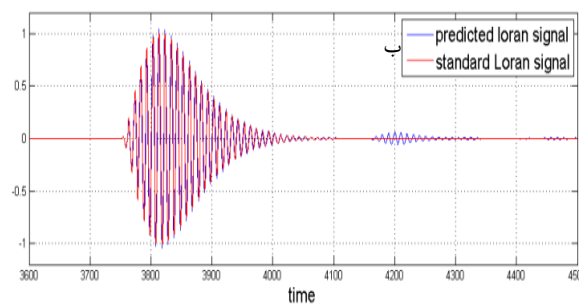
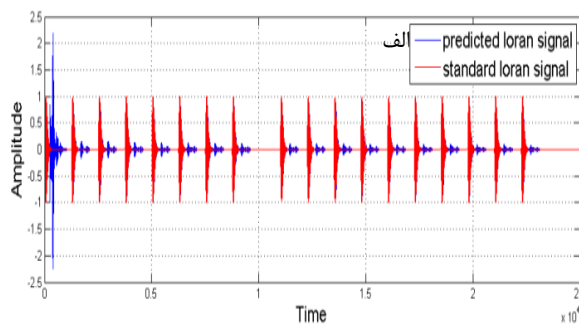
به منظور بررسی دقت الگوریتم پیشنهادی در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نیز مقایسه طیف توان سیگنال استاندارد لورن (سیگنال ارسالی) با طیف توان سیگنال تخمین زده شده و مقایسه طیف توان سیگنال تداخلی تخمین زده شده با سیگنال تداخلی واقعی آورده شده است.



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

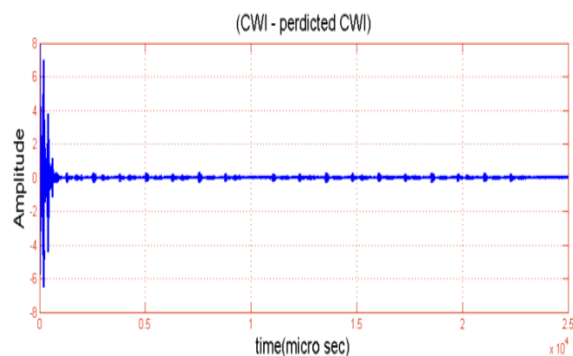


شکل ۱۵. مقایسه طیف توان سیگنال تداخلی تخمین زده شده با سیگنال تداخلی واقعی



شکل ۱۰. مقایسه دنباله پالس لورن ارسال شده با خروجی سامانه تطبیقی الف - مقایسه خروجی سامانه تطبیقی با دنباله استاندارد لورن و ب - مقایسه یک پالس خروجی سامانه تطبیقی پس از همگرایی الگوریتم با پالس استاندارد لورن (پالس چهارم قسمت الف)

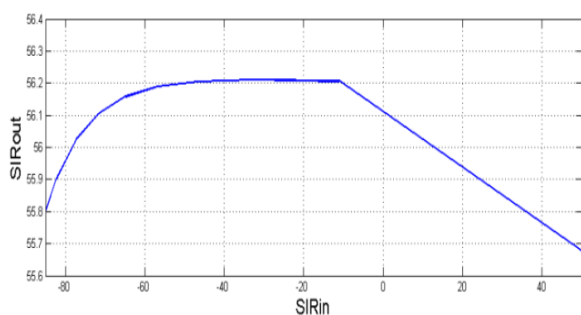
در شکل (۱۱) به منظور نمایش دقت، تفاضل تداخل تولیدشده واقعی با تداخل تخمین زده شده با استفاده از سامانه نمایش داده شده است. همان طور که از شکل مشخص است، در شروع سیگنال چون هنوز الگوریتم همگرا نشده است خطا بسیار زیاد است. اما کم کم الگوریتم همگرا شده و خطا کاهش یافته و تقریباً تداخل تخمینی با دقت خوبی برابر با تداخل واقعی می‌شود.



شکل ۱۱. تفاضل سیگنال تداخلی تخمین زده شده با سیگنال تداخلی واقعی (خطای تخمین)

در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) طیف توان سیگنال لورن استاندارد و طیف توان سیگنال دریافتی قبل از حذف تداخل آورده شده است. همان طور که از شکل مشخص است، در فرکانس‌های تداخلی و همچنین فرکانس کاری لورن در شکل پیک‌هایی به وجود آمده است که به وضوح می‌توان فرکانس سیگنال‌های تداخلی را تخمین زد.

مستقل از نسبت سیگنال به تداخل دریافتی می‌شود. اما با توجه به اینکه الگوریتم همواره مستقل از تداخل ورودی به خاطر اینکه از یک تقریب خطی برای تخمین سیگنال استفاده می‌کند، بنابراین مقداری خطا در خروجی باقی می‌ماند و کاملاً تداخل حذف نمی‌شود و به همین دلیل مقدار نسبت سیگنال به تداخل پس از اعمال الگوریتم در یک حدی ثابت باقی می‌ماند. مقدار این نسبت رابطه مستقیم با تعداد ضرایب فیلتر دارد.

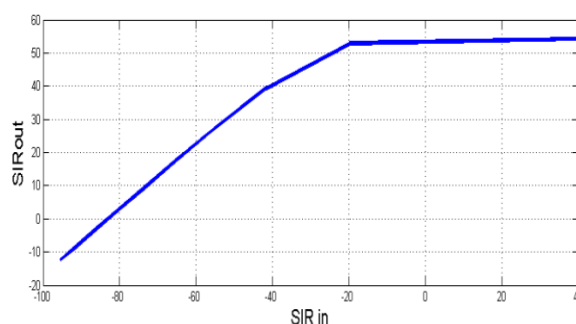


شکل ۱۷. تغییرات SIR پس از اعمال الگوریتم پیشنهادی در برابر افزایش دریافتی SIR برای یک پالس پس از زمان همگرایی

همان طور که در شکل‌های (۶) تا (۱۷) نشان داده شده است، به وضوح می‌توان مشاهده نمود که الگوریتم مطرح شده می‌تواند CWI را حذف نموده و سیگنال لورن را عملاً بازسازی کند. علاوه بر این، موج زمینی تخمین زده شده، تحت شرایط الگوریتم پیشنهادی نسبت به SIR سیگنال دریافتی رسم شد و مشاهده گردید که SIR موج زمینی تخمین زده شده پس از زمان همگرایی دارای تغییرات بسیار کوچک است.

علاوه بر این، نتایج حاصل از شبیه‌سازی بیانگر این است که الگوریتم پیشنهادی بهبود فوق‌العاده‌ای در نسبت SIR ورودی داشته و برای نسبت سیگنال به تداخل پس از اعمال الگوریتم پیشنهادی در برابر نسبت سیگنال به تداخل دریافتی پس از زمان همگرایی، بسته به نسبت سیگنال به تداخل در ورودی ۳۶ الی ۸۰ دسی‌بل بهبود را از خود نشان می‌دهد. شبیه‌سازی نشان می‌دهد که هنگامی که تعداد سینوسی‌ها در سیگنال تداخل موج پیوسته افزایش می‌یابد، برای ادامه روند حذف سیگنال تداخل موج پیوسته، تعداد وزن‌ها در فیلتر تطبیقی نیز باید افزایش یابد. برای یک سیگنال تداخل موج پیوسته که شامل ۲۰ سینوسی قوی است، تعداد وزن‌ها باید در حدود ۳۰۰ باشد. توجه به این نکته ضروری است که علاوه بر تداخل CWI، تداخل CRI و تداخل ناشی از امواج آسمانی نیز در سامانه لورن اثر مخربی ایجاد می‌کنند. یکی از ویژگی‌های این نوع از تداخل‌های این است که دقیقاً هم‌فرکانس با سیگنال لورن هستند. بنابراین الگوریتم

در شکل (۱۶) تغییرات نسبت سیگنال به تداخل پس از اعمال الگوریتم پیشنهادی در برابر نسبت سیگنال به تداخل دریافتی برای دنباله‌ای از پالس‌های دریافتی نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل مشخص است، بهبود فوق‌العاده‌ای در نسبت سیگنال به تداخل دریافتی به ویژه زمانی که نسبت سیگنال به تداخل پایین است، به وجود می‌آید (جدول ۱). چون مدت زمانی طول می‌کشد تا الگوریتم همگرا گردد، بنابراین با افزایش نسبت سیگنال به تداخل دریافتی، از یک حدی به بعد، تقریباً نسبت سیگنال به تداخل در خروجی مستقل از نسبت سیگنال به تداخل دریافتی می‌شود. دلیل این امر این است که الگوریتم همواره مستقل از تداخل ورودی به خاطر زمان همگرایی مقداری تداخل در ابتدای شروع به کار به وجود می‌آورد.



شکل ۱۶. تغییرات نسبت سیگنال به تداخل پس از اعمال الگوریتم پیشنهادی در برابر افزایش نسبت سیگنال به تداخل دریافتی

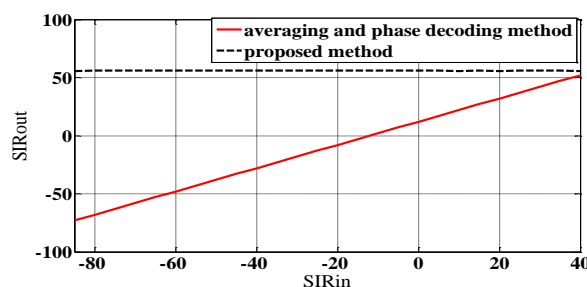
جدول ۱. مقایسه میزان بهبود در SIR برای دنباله‌ای از پالس‌های دریافتی

SIR in (dB)	SIR out (dB)	SIR در نسبت بهبود
-۶۰	۲۰	۸۰
-۴۰	۴۰	۸۰
-۲۰	۵۵	۷۵
-۱۰	۵۶	۶۶
۰	۵۶	۵۶
۱۰	۵۶	۴۶
۲۰	۵۶	۳۶
۳۰	۵۶	۳۶

در شکل (۱۷) تغییرات نسبت سیگنال به تداخل پس از اعمال الگوریتم پیشنهادی در برابر نسبت سیگنال به تداخل دریافتی برای یک پالس دریافتی پس از زمان همگرایی الگوریتم نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل مشخص است، با افزایش نسبت سیگنال به تداخل دریافتی، چون پالس دریافتی پس از زمان همگرایی الگوریتم نشان داده شده است، تقریباً نسبت سیگنال به تداخل در خروجی

است که این عامل باعث خطا در اندازه‌گیری زمان ورود و در نهایت کاهش دقت ناوبری می‌شود. در این مقاله به ارائه یک روش جدید برای حذف تداخل موج پیوسته در گیرنده سامانه ناوبری زمین پایه لورن-C با استفاده از الگوریتم تطبیقی خطی پرداخته شد. تطبیق وزن‌ها در این سامانه با استفاده از الگوریتم NLMS اجرا شده است. چون این سامانه از یک نسخه تأخیر یافته سیگنال مطلوب به عنوان ورودی فیلتر تطبیقی استفاده می‌کند، اثر سامانه مانند چند فیلتر ناچ قابل تنظیم است. ناچ‌ها دقیقاً در فرکانس‌های منابع تداخل که در سیگنال ورودی وجود دارد، قرار گرفته است، بنابراین هر تغییری در فرکانس و فاز سیگنال‌های تداخلی به سرعت توسط سامانه اصلاح خواهد شد. در نتیجه منابع تداخل جدید که ممکن است در حین عملیات رخ دهد، توسط ایجاد ناچ‌های قابل تنظیم جدید حذف خواهند شد. بزرگ‌ترین مزیت این روش پیشنهادی عدم نیاز به شناخت فرکانس‌های تداخلی و توزیع فرکانسی سیگنال‌های تداخلی است. نتیجه، یک سامانه است که به صورت خودکار فرکانس‌های نامعلوم را که شامل سینوسی‌ها است، در ورودی به دست آورده و سپس حذف می‌نماید. با توجه به نتایج به دست آمده برای سیگنال لورن، الگوریتم ارائه شده می‌تواند به طور مؤثر تأثیرات CWI بر روی گیرنده لورن را حذف نماید. از طریق شبیه‌سازی، صحت عملکرد سامانه بررسی شد و بیان گردید که چگونه سامانه قادر به حذف سیگنال تداخل موج پیوسته با تعداد مختلفی سینوسی با فرکانس و سطح توان مختلف است. نویز سفید توسط میانگین‌گیری در سرتاسر فاصله تکرار گروه کاهش می‌یابد. علاوه بر آن توسط انتخاب ثابت تطبیق بهینه و تعداد وزن‌های مناسب در الگوریتم تطبیق، توان نویز نسبت به پالس‌های لورن-C کاهش خواهد یافت. عملکرد سامانه نشان می‌دهد که وابستگی زیادی به ثابت تطبیق و تعداد وزن تپ‌ها در فیلتر تطبیقی دارد. با انتخاب بهینه این دو پارامتر، شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی هیچ مشکلی در حذف سیگنال تداخل موج پیوسته که شامل ۲۰ سینوسی قوی با سطوح توان متغیر است، ندارد. از خروجی نهایی سامانه می‌توان نتیجه گرفت که قطار پالس لورن-C به وضوح قابل‌شناسایی است. علاوه بر این، نتایج حاصل از شبیه‌سازی بیانگر این است که الگوریتم پیشنهادی بهبود فوق‌العاده‌ای در نسبت SIR ورودی داشته و برای نسبت سیگنال به تداخل پس از اعمال الگوریتم پیشنهادی در برابر نسبت سیگنال به تداخل در ورودی ۳۶ الی ۸۰ دسی‌بل بهبود را از خود نشان می‌دهد. همچنین هر تکرار از الگوریتم پیشنهادی نیازمند $3N+1$ عملگر ضرب است (N بیانگر تعداد وزن‌های فیلتر تطبیقی است)، و به راحتی و بدون هیچ‌گونه محدودیت سخت‌افزاری و بار محاسباتی قابل پیاده‌سازی است.

پیشنهادی هیچ اثر مخربی بر نحوه حذف تداخل CRI و تداخل ناشی از امواج آسمانی ندارد. این دو نوع تداخل با استفاده از روش‌های مخصوص به خود بعد از اعمال الگوریتم پیشنهادی می‌توانند حذف شوند [۱ و ۷]. به منظور مقایسه عملکرد الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم میانگین‌گیری و کدگشایی فاز، در شکل (۱۸) تغییرات نسبت سیگنال به تداخل پس از اعمال الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم میانگین‌گیری و کدگشایی فاز در برابر نسبت سیگنال به تداخل دریافتی برای یک پالس دریافتی پس از زمان همگرایی الگوریتم نشان داده شده است.



شکل ۱۸. مقایسه تغییرات SIR پس از اعمال الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم میانگین‌گیری و کدگشایی فاز در برابر افزایش SIR دریافتی

توجه به این نکته ضروری است که در عمل معمولاً نسبت سیگنال به تداخل دریافتی در این سامانه عددی بین -30 dB تا 12 dB است. بنابراین همان‌طور که از جدول (۳) مشخص است، برای این رنج عددی از نسبت سیگنال به تداخل، الگوریتم پیشنهادی بهبود بسیار بالایی نسبت به الگوریتم میانگین‌گیری و کدگشایی فاز دارد.

جدول ۳. مقایسه بهبود SIR برای یک پالس دریافتی پس از زمان همگرایی الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم میانگین‌گیری و کدگشایی فاز

SIR in (dB)	نسبت در روش میانگین‌گیری و کدگشایی فاز	نسبت SIR در روش پیشنهادی	نسبت بهبود SIR در (dB)
-۷۰	-۵۸	۵۶	۱۱۴
-۶۰	-۴۸	۵۶/۱	۱۰۴/۱
-۴۰	-۲۸	۵۶/۲	۸۴/۲
-۲۵	-۱۳	۵۶/۲	۶۹/۲
-۱۵	-۳	۵۶/۱	۵۹/۱

۶. نتیجه‌گیری

استفاده از سامانه لورن در ناوبری، به دلیل امکان بهبود کارایی آن با استفاده از سخت‌افزارها و الگوریتم‌های پردازشی جدید و مصونیت در مقابل جمینگ، در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. منابع مختلف خطا که از جمله مهم‌ترین آن‌ها تداخل موج پیوسته است، باعث خطا در ردیابی فاز سیگنال شده

۷. مراجع ها

- [17] Beckmann, M. "Synchronous Interference to Loran-C and its Influence on Cycle Identification"; Proc. Int. Conf. The Wild Goose Association 1990, 105-113.
- [18] Bayat, M.; Madani, M. H. "Navigation Accuracy Improvement Using a New Integrated Algorithm of TOA/TDOA in Ground-based Loran Systems"; J. Aeronautical Eng. 2015, 16, 37-60.
- [19] Manish, L. "Characterization of Atmospheric Noise and Precipitation Static in the Loran-C Band for Aircraft"; M.Sc. Thesis, Ohio University, Athens, OH, 2004.
- [20] Helwig, O. M.; Willigen, V. "Implementation and Testing of Euro Fix in Standard Loran C Receiver Technology"; Proc. Int. Symp. Annual Technical 1996, 33-42.
- [21] Lombardi, M. A. "Microsecond Accuracy at Multiple Sites: Is it Possible without GPS"; IEEE Instrum. Meas. Mag. 2012, 64, 14-21.
- [22] Baetsen, R. H. "An Investigation of Inter-Triad Interference in the Loran C Navigation System"; M.Sc. Thesis, U.S. Naval Postgraduate School, Monterey, California, 1960.
- [23] Peter, F.; Swaszek, L. "Loran Phase Codes Revisited"; Proc. Int. Symp. IEEE/ION 2008, 30-37.
- [24] Lee, C. O.; Boyce, Jr. "Atmospheric Noise Mitigation For Loran"; Ph.D. Thesis, Stanford University, Medford, MA, 2007.
- [25] Joglekar, A.; Gupta, J.; Ylvisaker, I. "Evaluation of Loran C for Domestic Air Navigation"; Report No. MTR-7180, the MITRE Corporation, McLean, VA, 1976.
- [26] Feldman, D. A.; Pakos, P. E.; Potts, C. E. "Analysis and Minimization of Mutual Interference of Loran C Chains"; Proc. Int. Symp. Annual Technical 1975, 21-28.
- [27] Bayat, M.; Madani, M. H. "A Combined Improved Algorithm to Estimating the Delay of Sky waves In Loran c Receiver"; J. Elect. Cyber. 2014, 4, 54-81.
- [28] Wei, X.; Yan, L.; Qing, L. "Loran-C Synchronous Interference Suppression Using Improved Adaptive Algorithms"; IEEE Trans. Audio. Speech. Language Proc. 2007, 57, 47-49
- [29] Lili, Z.; Zhonglin, M.; Yurong, P.; Xiaoli, X. "Long-Range 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 Micro. Antenna. Propag. 2015, 68, 413-422.
- [30] Beckmann, M. "Synchronous Interference to Loran-C and its Influence on Cycle Identification"; Proc. Int. Conf. The Wild Goose Association. 1990, 105-113.
- [31] [Schuldt](#), Ch.; [Lindstrom](#), F. "Low-Complexity Adaptive Filtering Implementation for Acoustic Echo Cancellation"; [TENCON](#) IEEE, 2006, 5, 154-181.
- [32] Haykin, S.; Widrow, B. "Least-Mean-Square Adaptive Filters"; J. Elect. Cyber. 2014, 4, 54-81.
- [33] Roth, P. R. "Effective Measurements Using Digital Signal Analysis"; IEEE Spectrum 1971, 8, 62-70.
- [1] Bayat, M.; Madani, M. H. "Loran Phase Code Revisited for Continuous Wave Interference Cancellation"; IET Sci. Measurement & Tech. 2017, 11, 322-330.
- [2] Arthur, H.; Gerard, O.; Chris, S.; Charles, S. "Design and Performance of a Low Frequency Time and Frequency Dissemination Service"; Proc. Int. Meeting, FAA APNT Public 2013, 75-84.
- [3] Helwig, A.; Offermans, G.; Schue, C. "Low Frequency (LF) Solutions for Alternative Positioning, Navigation, Timing and Data (APNT&D) and Associated Receiver Technology"; Proc. Int. Meeting (ITM), ION 2011, 166-183.
- [4] Narins, M. "Alternative Positioning, Navigation, and Timing Initiative Assumptions and Requirements"; Proc. Int. Meeting. FAA APNT Public 2010, 41-49
- [5] Lin, H.; Zhou, H.; Liu, F. "Research on Phase Coding Identification of Loran-C Signal under the Background of Strong CWT"; J. Test. Measur. Tech. 2012, 52, 252-255.
- [6] Beckmann, M. "Synchronous Interference to Loran-C and its Influence on Cycle Identification"; Proc. Int. Conf. The Wild Goose Association 1990, 105-113.
- [7] Bayat, M.; Madani, M. H. "Analysis and Simulation of a Hybrid Filter to Cancel Cross Rate Interference in Loran System"; Advanced Defence Sci. & Tech. 2017, 4, 51-60.
- [8] Helwig, A.; Offermans, G.; Stout, C.; Schue, C. "Next Generation Low Frequency Solutions for Alternative Positioning, Navigation, Timing, and Data (PNT&D) Services and Associated Receiver Technology"; Proc. Int. Meeting (ITM), ION 2012, 1221-1232
- [9] Van Der Wal, P. W.; Van Willigen, D. "Hard Limiting and Sequential Detection Applied to Loran C"; IEEE Trans. Aerospace Elec. Sys. 1978, 64, 649-661.
- [10] Bayat, M.; Mazloom, J. "Design and Simulation of a Linear Adaptive System to Eliminate the Effect of Single-frequency Jammer in Warplane Data Link"; J. Aeronautical Eng. 2016, 18, 51-59.
- [11] Frank, R. L. "Multiple Pulse and Phase Code Modulations in the Loran C System"; IRE Trans. Aeronautical. Nav. Elec. 1960, 7, 55-61.
- [12] Last, D., Bian, Y. "Carrier Wave Interference and Loran-C Receiver Performance"; IEE Proceedings-F 2008, 140, 273-283
- [13] Zhou, L. L.; Xi, X. L.; Liu, J. F.; Yu, N. M. "LF Ground-Wave Propagation Over Irregular Terrain"; IEEE Trans. Antennas Propag. 2011, 59, 1254-1260.
- [14] Lu, W.; Xue, L.; Liu, X. "Analysis of Carrier Wave Interference Suppression in Loran-C Receiver"; J. Ship Elec. Eng. 2006, 9, 77-79.
- [15] Bayat, M.; Madani, M. H. "A New Algorithm for Synchronous Continuous Wave Interference Cancellation in Loran Navigation System"; J. Elec. Cyber. 2016, 9, 12-26.
- [16] Meng, Q.; Zhou, X.; Liu, H. "Noise Suppression Technique by Adaptive Filter in Loran-C Receiver"; J. Modern Electronics Tech. 2007, 31, 5-9.

