

تحلیل و شبیه‌سازی یک فیلتر ترکیبی به منظور حذف تداخل نرخ متقابل در سامانه لورن

میثم بیات^۱، محمدحسین مدنی^{۲*}

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

(دریافت: ۹۵/۰۶/۲۷، پذیرش: ۹۵/۰۹/۱۵)

چکیده

استفاده از سامانه لورن، به دلیل مصونیت در مقابل جَمینگ 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. یکی از مهم‌ترین منابع خطا در سامانه ناوبری لورن، تداخل نرخ متقابل (CRI) است. در این مقاله، تحلیل حذف تداخل نرخ متقابل در سامانه‌های لورن با استفاده از یک فیلتر ترکیبی از طریق تحلیل سیگنال در حوزه فرکانس انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد، فیلتر ترکیبی تداخل ناشی از زنجیره مزاحم را تقریباً به طور کامل حذف می‌نماید و هیچ اثر مخربی بر روی طیف سیگنال زنجیره مطلوب ندارد. خطوط طیفی که در فرکانس‌های معادل با معکوس بزرگ‌ترین مقسوم‌علیه مشترک بین PCI زنجیره مورد نظر با زنجیره‌های هم‌جوار مزاحم است، با کدینگ فاز کنونی حذف نمی‌شوند. البته تعداد خطوط طیفی که روش پیشنهادی قادر به حذف آن‌ها نیست، بسیار محدود است و تأثیر در عملکرد سامانه ندارد. در عمل می‌توان از دو یا سه فیلتر notch با پهنای بسیار کوچک برای حذف این خطوط باقی‌مانده استفاده نمود، بدون اینکه تأثیر در طیف استاندارد لورن داشته باشد. همچنین سیگنال لورن در حوزه فرکانس با استفاده از فیلتر پیشنهادی تحلیل شده است تا به نحوه طراحی کدینگ فاز جدید به منظور حذف کامل اثر تداخل CRI ناشی از زنجیره‌های لورن مزاحم پرداخته شود.

کلیدواژه‌ها: سامانه لورن، تداخل نرخ متقابل (CRI)، حوزه فرکانس، PCI، GRI

Analysis and Simulation of a Hybrid Filter to Cancel Cross Rate Interference in Loran System

M. Bayat, M. H. Madani*

Malek Ashtar University of Technology

(Received: 17/09/2016; Accepted: 05/12/2016)

Abstract

The use of Loran system is a strong defense 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. One of the most important error sources in Loran navigation system is the Cross Rate Interference (CRI). If such interference is not eliminated, the accuracy of the navigation will considerably be decreased. The aim of this study was to eliminate the CRI in Loran systems using a hybrid filter and loran signal analysis in frequency domain. The results demonstrated that the hybrid filter could eliminate the interference of the irritating chain completely and, therefore, there was not any destructive effect on the desired spectrum signal. However, the spectral lines located in the frequencies which are equal to reverse of the greatest common divisor between the Phase Code Interval (PCI) of desirable chain and adjacent irritating ones could not be eliminated with the proposed phase coding approach. Spectral lines that could not be eliminated, are few and do not have significant effects on the system performance. In practice, it is feasible to completely eliminate the remaining spectral lines using two or three of very narrow-band notch filters without causing significant effects on the standard Loran spectrum. Furthermore, Loran system has been analyzed in frequency domain, using the proposed filter in order to discuss the design of the new PCI in eliminating CRI effects caused by Loran irritating chains.

Keywords: Loran Navigation System, Cross Rate Interference (CRI), TOA, GRI, PCI

* Corresponding Author E-mail: Mh_madani@aut.ac.ir

۱. مقدمه

سامانه ناوبری لورن^۱ یک سامانه ناوبری رادیویی زمینی با برد زیاد است. طراحی این سامانه با استفاده از ایستگاه‌های زمینی که به صورت زنجیره‌ای سازمان‌دهی شده‌اند، انجام شده است. سامانه لورن C در طیف فرکانس رادیویی ۹۰-۱۱۰ KHz عمل می‌کند [۱-۳]. 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 [۴-۱۲]. یکی از مهم‌ترین عوامل خطا در سامانه‌های لورن، تداخل ناشی از روی هم افتادگی پالس‌های دریافتی از دو زنجیره متفاوت لورن (CRI^۲) است. CRI در سامانه لورن زمانی رخ می‌دهد که سیگنال‌های یک زنجیره (زنجیره مورد نظر) با فاصله تکرار گروه (GRI^۳) با سیگنال‌های زنجیره دیگر با GRI₂ با یکدیگر انطباق زمانی پیدا می‌کنند. استخراج اطلاعات مربوط به تعیین موقعیت از اندازه‌گیری‌های زمان ورود (TOA) که تحت تأثیر تداخل نرخ متقابل قرار گرفته‌اند، باعث کاهش دقت ناوبری و افزایش چشمگیر زمان دریافت کلی (زمان‌های انتخاب چرخه و زمان جستجو) در سامانه لورن می‌شود. این زمان جستجو ۳٪ به عنوان یک مرز پایینی و ۲۰٪ به عنوان مرز بالایی به دلیل تداخل CRI از ۱۰ ایستگاه تداخلی افزایش خواهد یافت و زمان لازم برای انتخاب چرخه سوم ۲۰٪ افزایش خواهد یافت [۱۳ و ۱۴]. زمان دریافت کلی تخمین زده شده از الگوریتم‌های جستجو و انتخاب چرخه تعیین می‌شود [۱۵ و ۱۶]. هنگامی که سیگنال‌های تداخلی با هر سیگنال مطلوبی هم‌پوشانی داشته باشد، احتمال دریافت سیگنال مطلوب کاهش می‌یابد. این کاهش توسط تحلیل مرحله به مرحله و با این فرض که گیرنده ثابت است و از پردازش کرویشن (همبستگی) استفاده می‌کند، تخمین زده می‌شود [۱۷ و ۱۸].

بررسی تأثیرات CRI از سال ۱۹۶۰ شروع شد. در پژوهش‌های پیشین بر مبنای انتخاب GRIها و کدینگ فاز و پردازش روی آن‌ها برای کمینه کردن خطای رهگیری CRI تحلیل‌هایی انجام شده است [۱۹-۲۳]. همچنین در برخی از مقالات مدل گیرنده با استفاده از برون‌یابی استخراج گشته و یک طراحی مدرن با استفاده از تکنولوژی میکروپروسسور طراحی می‌شود

[۲۴ و ۲۵]. مشخصات کلیدی این طراحی جستجوی موازی با استفاده از جعبه‌های نمونه‌گیری در حین جستجو برای کدینگ فاز [۲۴]، فرضیه تصمیم متوالی به منظور تعیین کردن زمان جستجو [۲۵]، پردازش همبستگی در حالت‌های ردگیری و جستجو برای حذف تداخل [۱۷]، حایل‌های قبل و بعد با فرضیه تصمیم متوالی اعمال شده به هر حایل به منظور تعیین محل چرخه سوم [۲۵]، و شناسایی و رد اختلال است [۲۴]. پژوهش‌های انجام شده تاکنون به تحلیل و کاهش اثر تداخل CRI در حوزه زمان پرداخته‌اند. در این پژوهش‌ها با استفاده از گیرنده‌هایی که در چند زنجیره و چند ایستگاه کار می‌کنند، CRI بهبود می‌یابد. چنین گیرنده‌هایی می‌توانند زمان وقوع CRI از ایستگاه دیگر را پیش‌بینی نمایند. در این صورت گیرنده‌ها می‌توانند تصمیم بگیرند که از پالس‌های صدمه دیده چشم‌پوشی نمایند (در نتیجه اطلاعات موجود در پالس‌ها از دست می‌روند) [۱۶]. یک راه‌حل دیگر که پیچیده‌گی کمتری دارد اما مؤثر و پیاده‌سازی آن ساده است، بر مبنای این واقعیت قرار دارد که شکل پالس لورن (یعنی پوش پالس) در شرایط معمول نمی‌تواند تغییرات زیادی بین GRIهای متوالی داشته باشد. به احتمال زیاد تغییر بزرگ در شکل پالس در اثر تداخل نرخ متقابل یا شرایط جوی رخ می‌دهد. از این رو می‌توان قسمت‌هایی از پالس که تغییرات بزرگی در پوش آن‌ها رخ می‌دهد را حذف نمود. برای انجام عمل فوق یک شکل مرجع از پالس‌های ردیابی شده ایستگاه لورن C نگهداری می‌شود. پوش پالس‌های دریافتی با پوش پالس مرجع مقایسه می‌شود. قسمت‌هایی از پالس که پوش آن در درون یک محدوده پوش مرجع قرار نمی‌گیرد، حذف می‌شود [۲۶ و ۲۷]. همان‌گونه که مشخص است، تمامی روش‌های یاد شده باعث از بین رفتن اطلاعات در برخی از زمان‌ها می‌شوند و زمان لازم برای ناوبری را طولانی‌تر می‌نمایند.

هدف از این مقاله تحلیل عملکرد سامانه ناوبری لورن در مواجهه با CRI در حوزه فرکانس و ارائه یک فیلتر ترکیبی برای حذف CRI است. فیلتر پیشنهادی به منظور بهبود کاهش CRI در سامانه لورن، برای بهبود کارایی و افزایش دقت ناوبری ارائه شده است. با استفاده از روش پیشنهادی بدون از دست دادن اطلاعات و افزایش زمان جستجو می‌توان تأثیرات CRI بر روی سامانه لورن را کاهش داد و دقت اندازه‌گیری‌های مربوط به 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 یک تحلیل از اثر کدینگ فاز بر روی تداخل نرخ متقابل در حوزه

¹ Long Range Navigation

² Cross Rate Interference

³ Group Repetition Interval

در طول دو گروه پالس متوالی امتداد دارد و سپس تکرار می‌شود. این روش به عنوان کدینگ فاز شناخته می‌شود. به عبارت دیگر سیگنال لورن، متناوب با دوره تناوب دو برابر بازه تکرار گروهی است. این دوره تناوب بازه کدینگ فاز^۱ نامیده می‌شود [۲۸ و ۲۹]. این الگوی کد فاز برای فرستنده‌های اصلی و ثانویه متفاوت است. کدینگ فاز به منظور کاهش اثر تداخل و نویز روی فواصل زمانی اندازه‌گیری و همچنین به منظور تشخیص بین ایستگاه‌های اصلی و ثانویه، استفاده می‌شود. الگوی فوق در جدول (۱) نمایش داده شده است [۳۰].

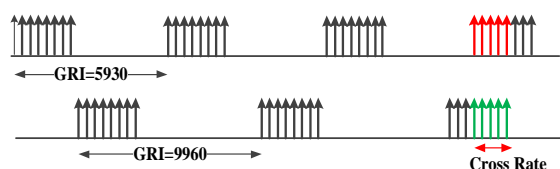
جدول ۱. الگوی کد فاز برای فرستنده‌های اصلی و ثانویه [۳۰]

The Radio Station

گروه	ایستگاه اصلی	ایستگاه ثانویه
A	++--+-+--+	+++++--+
B	+---++++-	+--+-+--

۳. تحلیل اثر کدینگ فاز بر روی تداخل نرخ متقابل در حوزه فرکانس

در شکل (۱) نحوه تداخل دو زنجیره با GRI متفاوت نشان داده شده است. در این شکل در جایی که پالس‌های دو زنجیره از نظر زمانی بر هم منطبق می‌شوند، تداخل CRI به وجود می‌آید. در شب به واسطه امواج آسمانی تعداد زنجیره‌هایی که سیگنال‌های آن‌ها دریافت می‌شوند، افزایش می‌یابد و در نتیجه CRI زیاد می‌شود. از کد تصحیح خطا برای بی اثر کردن این تداخل استفاده می‌شود. CRI سبب می‌شود یک تأخیر در دریافت سیگنال به وجود آید و یک خطا در اندازه‌گیری اختلاف زمانی در حالت رهگیری گیرنده ایجاد شود. اگر گروه پالس‌ها با پالس‌های نرخ متقابل برخورد نمایند، بسیار محتمل است که بیشتر از یک پالس خراب شود. بنابراین در لورن C بهبود یافته، تداخل نرخ متقابل به خطاهای برست منجر می‌شود.



شکل ۱. نمونه‌ای از تداخل نرخ متقابل بین دو زنجیره با GRI‌های ۵۹۳۰ و ۹۹۶۰

فرکانس ارائه شده است. در بخش ۴ یک فیلتر ترکیبی برای حذف اثر CRI ارائه و نحوه عملکرد آن در حوزه فرکانس تحلیل شده است. در بخش ۵ نتایج شبیه‌سازی برای دو زنجیره از سیگنال‌های لورن نزدیک به هم با GRI مشخص که بر روی هم تداخل CRI ایجاد می‌نمایند، آورده شده است. در پایان، نتیجه‌گیری از تحلیل‌های صورت گرفته انجام شده است.

۲. معرفی سامانه ناوبری لورن

سامانه لورن شامل یک زنجیره متشکل از حداقل ۳ فرستنده است. فرستنده‌ها چند صد مایل از یکدیگر فاصله دارند. در زنجیره لورن، یک فرستنده به عنوان ایستگاه اصلی با علامت M (Master) و بقیه فرستنده‌ها به عنوان ایستگاه‌های ثانویه و با علامت‌های، (Victor) V، (Whiskey) W، (Xvay) X، (Yankee) Y و (Zulu) Z مشخص می‌شوند [۲۶]. 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 امتداد یک خط مکان‌یاب هدلولوی قرار می‌دهد. فصل مشترک دو یا چند خط مکان‌یاب هدلولوی که توسط دو یا چند اندازه‌گیری اختلاف زمانی ایجاد می‌شود، مکان گیرنده را تعریف می‌کند.

هر رشته از سیگنال‌های ارسالی شامل یک گروه پالس ارسالی از ایستگاه اصلی M و گروه‌های پالس ارسالی از فرستنده‌های ثانویه است. پالس‌ها در فواصل زمانی مشخص ارسال می‌شوند. 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 [۲۷]. ایستگاه‌های ثانویه فقط ۸ پالس ارسال می‌نمایند. این پالس‌ها با فاصله زمانی $1000 \mu\text{sec}$ از یکدیگر قرار دارند. این اختلاف در تعداد پالس‌ها و دیگر مشخصات سیگنال باعث می‌شود تا گیرنده لورن 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. GRI بر حسب میکروثانیه بیان می‌شود. مشخصه GRI برابر با مقدار GRI تقسیم بر ۱۰ است و به عنوان علامتی برای مشخص کردن زنجیره لورن به کار می‌رود. در داخل هر گروه پالسی، هر پالس با یک فاز حامل که 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

^۱ Phase Code Interval (PCI)

بنابراین، طیف نهایی یک دنباله از پالس‌های لورن با GRI مشخص بستگی به رابطه (۸) دارد. از آنجا که PCI مساوی دو برابر GRI است بنابراین داریم:

$$d_n = c_n \left[\sum_{m=0}^7 b_m e^{-j2\pi n \tau_m / PCI} + \sum_{m=8}^{15} b_m e^{-j2\pi n \tau_m / PCI} \right] \quad (9)$$

و از طرفی داریم:

$$\text{for } 0 \leq m \leq 7 \Rightarrow e^{-j2\pi n \tau_m / PCI} = e^{-j2\pi n (1000m) / PCI}$$

$$= \begin{cases} e^{-j2\pi n (1000m) / PCI} & , n = 2k \\ e^{-j2\pi n (1000m) / PCI} & , n = 2k + 1 \end{cases} \quad (10)$$

و برای $8 \leq m \leq 15$

$$\text{for } 8 \leq m \leq 15 \Rightarrow e^{-j2\pi n \tau_m / PCI} = e^{-j2\pi n (GRI + 1000m) / PCI}$$

$$= \begin{cases} e^{-j2\pi n (1000m) / PCI} & , n = 2k \\ e^{-j\pi n} e^{-j2\pi n (1000m) / PCI} & \\ -e^{-j2\pi n (1000m) / PCI} & , n = 2k + 1 \end{cases} \quad (11)$$

پس d_n به صورت زیر به دست می‌آید:

$$d_n = c_n \sum_{m=0}^{15} b_m e^{-j2\pi n \tau_m / PCI}$$

$$= c_n \begin{cases} \sum_{m=0}^7 (b_m + b_{m+8}) e^{-j2\pi n (1000m) / PCI} & , n = 2k \\ \sum_{m=0}^7 (b_m - b_{m+8}) e^{-j2\pi n (1000m) / PCI} & , n = 2k + 1 \end{cases} \quad (12)$$

۴. ارائه یک فیلتر ترکیبی به منظور حذف CRI

برای بهبود دریافت سیگنال مطلوب در حضور سیگنال زنجیره‌های احتمالی دیگر، گیرنده لورن می‌تواند از یک فیلتر ترکیبی استفاده نماید. در شکل (۲)، نمودار بلوکی یک فیلتر Comb/Notch طراحی شده به منظور حذف تداخل CRI آورده شده است. این فیلتر برای دو سیگنال نشان داده شده است (سیگنال زنجیره‌های احتمالی اضافی می‌تواند توسط مسیرهای موازی اضافی تطبیق شوند). در این نمودار، فیلتر به صورت زیر تعریف می‌شود:

در این بخش نرخ متقابل از چشم‌انداز حیطه فرکانسی بررسی می‌شود. چون سیگنال لورن پریودیک با پریودی برابر با زمان PCI است، می‌تواند توسط سری‌های فوریه به طور کامل تحلیل شود. برای این تحلیل، با پالس مجزای لورن آغاز می‌شود که در زمان صفر در نقطه شروع PCI است. با در نظر گرفتن شیفت فرکانسی dc به اندازه ۱۰۰ کیلوهرتز، بسط فوریه آن به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{j2\pi n t / PCI} \quad (1)$$

که در آن،

$$c_n = \frac{1}{PCI} \int_0^{PCI} p(t) e^{-j2\pi n t / PCI} dt \quad (2)$$

با فرض اینکه زمان به میکروثانیه اندازه‌گیری شده باشد، برای پالس لورن داریم [۳۰]:

$$p(t) = t^2 e^{-2t/65} u(t) \quad (3)$$

با جایگذاری رابطه (۳) در رابطه (۲) و گرفتن انتگرال و ساده‌سازی داریم:

$$c_n = \frac{65^3 PCI^2}{4(PCI + j65\pi)^3} \quad (4)$$

در حقیقت هر PCI لورن استاندارد بدون در نظر گرفتن پالس نهم ایستگاه اصلی از ۱۶ پالس تشکیل شده است، بنابراین داریم:

$$s(t) = \sum_{m=0}^{15} b_m p(t - \tau_m) \quad (5)$$

با اضافه کردن تغییر زمانی τ_m ، تغییر فاز در ضرایب سری فوریه ایجاد می‌شود. همچنین با توجه به خطی بودن تبدیل فوریه، بسط b_m به طور مستقیم ضریب را تعدیل می‌کند، بنابراین با اعمال تأخیر و ضرایب b_m داریم:

$$c_n \rightarrow b_m c_n e^{-j2\pi n \tau_m / PCI} \quad (6)$$

چون سیگنال لورن مجموع ۱۶ پالس است، نمایش سری فوریه آن به صورت زیر است:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_n e^{j2\pi n t / PCI} \quad (7)$$

که در آن با توجه به رابطه (۶) داریم:

$$d_n = c_n \sum_{m=0}^{15} b_m e^{-j2\pi n \tau_m / PCI} \quad (8)$$

طیفی که در فرکانس‌های معادل با معکوس بزرگ‌ترین مقسوم- علیه مشترک بین N_1 و N_2 هستند. همچنین ضرایب فیلتر ترکیبی برای تمامی خطوط طیفی که معادل فرکانس $\frac{f}{f_s} = K / N_1$ هستند به صورت زیر به دست می‌آید:

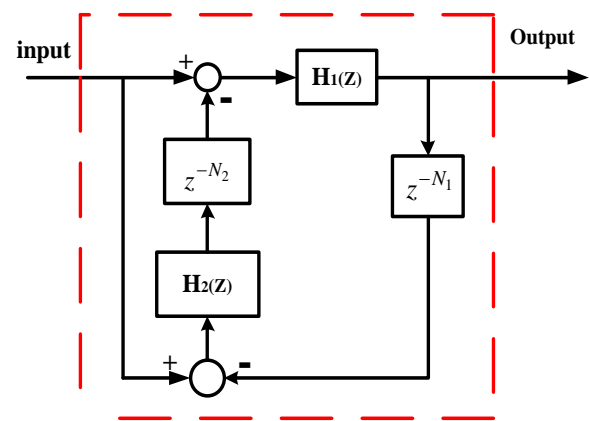
$$H_{Total}(Z) \Big|_{Z=e^{jw}, w=2\pi\left(\frac{f}{f_s}\right), \frac{f}{f_s}=K/N_1, K \in Z} = 1 \quad (17)$$

$$\text{If } \frac{f}{f_s} \neq \frac{K}{\text{gcd}(N_1, N_2)}$$

رابطه (۱۷) نشان می‌دهد، ضرایب فیلتر ترکیبی برای تمامی خطوط طیفی که معادل فرکانس $\frac{f}{f_s} = K / N_1$ هستند برابر مقدار واحد است. البته به جز خطوط طیفی که در فرکانس‌های معادل با معکوس بزرگ‌ترین مقسوم‌علیه مشترک بین N_1 و N_2 هستند. نکته دیگری که مشهود است، تردید فیلتر درباره نحوه عملکردش در ۱۰۰ کیلوهرتز است. چون خط طیفی ۱۰۰ کیلوهرتز در هر دو طیف دیده می‌شود. در حقیقت، طیف‌های لورن خطوط طیفی را در همه فرکانس‌هایی که ضرایب صحیح از معکوس بزرگ‌ترین مقسوم‌علیه مشترک دو PCI هستند، سهم‌اند. یک پالس بازسازی شده از طیف خروجی این فیلتر برای زنجیره مطلوب، غیر قابل تمایز از پالس لورن عادی است. شکاف کار خود را به خوبی انجام می‌دهد و همه خطوط طیفی زنجیره مزاحم با تعداد نمونه‌های N_2 را به جز خطوط مشترک طیف زنجیره مطلوب به صفر می‌رساند. این خطوط مشترک باقی‌مانده، کم است، چرا که فقط چند عدد از بین چندین خط اصلی است. همچنین فیلتر ترکیبی تمام خطوط طیفی زنجیره مطلوب با تعداد نمونه‌های N_1 به جز در خطوط مشترک با طیف زنجیره مزاحم را بدون تغییر عبور می‌دهد. برای روشن‌تر شدن نحوه عملکرد فیلتر برای حذف تداخل یک نمونه از GRI‌های واقعی که بر روی هم تداخل ایجاد می‌کنند، بررسی می‌شود.

اگر این فیلتر برای حذف تداخل CRI ناشی از زنجیره مزاحم $GRI=5930$ که بر روی زنجیره مورد نظر با $GRI=9960$ تداخل ایجاد می‌کند به کار رود آنگاه مقدار N_2 با توجه به اینکه هر $GRI=2GRI$ است و یک GRI از نظر زمانی مساوی با عدد GRI ضرب در ۱۰ میکروثانیه است، بنابراین مقدار N_2 از رابطه (۱۸) به دست می‌آید:

$$N_2 = f_s * 10 * 5930 * 2 * 10^{-6} = \frac{f_s}{10^6} = \frac{f_s}{8.39} \quad (18)$$



شکل ۲. فیلتر دیجیتال برای دو سیگنال ناشی از زنجیره‌های مختلف لورن

$$H_k(z) = \frac{1-a}{1-az^{-N_k}}, \quad K=1 \text{ Or } 2 \quad (13)$$

پاسخ فرکانسی کل فیلتر به صورت زیر به دست می‌آید:

$$H_{Total}(z) = \frac{H_1(z) - H_1(z)H_2(z)Z^{-N_2}}{1 - H_1(z)H_2(z)Z^{-(N_1+N_2)}} \quad (14)$$

با جایگذاری رابطه (۱۳) در رابطه (۱۴) و ساده‌سازی پاسخ فرکانسی نهایی فیلتر به دست می‌آید:

$$H_{Total}(z) = \frac{(1-a) - (1-a)Z^{-N_2}}{1 - aZ^{-(N_2)} - aZ^{-(N_1)} + (2a-1)Z^{-(N_1+N_2)}} \quad (15)$$

در رابطه (۱۵)، N_1 تعداد نمونه‌ها در اولین PCI و N_2 ، تعداد نمونه‌ها در دومین PCI را نشان می‌دهد (برای N_1 برای GRI زنجیره مورد نظر، N_2 برای زنجیره مزاحم است و مقادیر بستگی به نرخ نمونه‌گیری سامانه دارد) و $0 < a < 1$ یک مقدار ثابت است. ضرایب فیلتر ترکیبی برای تمامی خطوط طیفی که معادل فرکانس $\frac{f}{f_s} = K / N_2$ هستند به صورت زیر به دست می‌آید:

$$H_{Total}(Z) \Big|_{Z=e^{jw}, w=2\pi\left(\frac{f}{f_s}\right), \frac{f}{f_s}=K/N_2, K \in Z} = 0$$

$$\text{If } \frac{f}{f_s} \neq \frac{K}{\text{gcd}(N_1, N_2)}$$

همان‌طور که از رابطه (۱۶) مشخص است، ضرایب فیلتر ترکیبی برای تمامی خطوط طیفی که معادل فرکانس $\frac{f}{f_s} = K / N_2$ هستند برابر مقدار صفر است. البته به جز خطوط

با جایگذاری رابطه‌های (۲۳) و (۱۸) در رابطه (۱۷) دارید:

$$H_{Total}(Z) \Big| Z = e^{(jw)}, w = 2\pi \left(\frac{f}{f_s} \right), f = K * 5.02, \quad (24)$$

$$K \in Z = 1 \quad \text{If } f \text{ (HZ)} \neq 5000K$$

رابطه (۲۴) نشان می‌دهد فیلتر ترکیبی که برای حذف تداخل CRI ناشی از زنجیره مزاحم $GRI=5930$ بر روی زنجیره مورد نظر با $GRI=9960$ به کار می‌رود، دارای ضرایب واحد در تمامی فواصل فرکانسی به اندازه $5/0.2$ HZ است. فاصله هر دو خط طیفی هم‌جوار در طیف لورن استاندارد با توجه به رابطه (۱۲) برای $GRI=9960$ برابر با 5.02 HZ است.

بنابراین فیلتر ترکیبی کار خود را به خوبی انجام می‌دهد و تمام خطوط طیفی زنجیره مطلوب را بدون تغییر از خود عبور می‌دهد. همان‌طور که گفته شد، همه طیف‌های لورن شامل خطی در ۱۰۰ کیلوهرتز هستند. می‌توان دامنه این خط را با انتخاب مناسب کدینگ فاز صفر کرد. ضریب خط $n=0$ را در نظر بگیرید:

$$d_0 = c_0 \sum_{m=0}^{15} b_m e^{-j0} = c_0 \sum_{m=0}^{15} b_m \quad (25)$$

اگر مجموع کدینگ فاز صفر گردد، آنگاه دامنه این خط طیفی صفر می‌شود. این مشخصه کدینگ فاز، توسط کدهای فاز کنونی به دست نمی‌آیند. علاوه بر خط $n=0$ ، دو سیگنال لورن دارای خطوط مشترک دیگری در همه مضرب‌های صحیح معکوس بزرگ‌ترین مقسوم‌علیه مشترکشان خواهند بود (در مضرب‌های صحیح از معکوس بزرگ‌ترین مقسوم‌علیه مشترک PCI_1 و PCI_2). برای مثال معکوس بزرگ‌ترین مقسوم‌علیه مشترک PCI_1 و PCI_2 برای زنجیره‌هایی با عدد $GRI=9960$ و $GRI=5930$ برابر با ۵ کیلوهرتز است. بنابراین فیلتر یاد شده تمام خطوط طیفی $GRI=5930$ که به عنوان زنجیره مزاحم در نظر گرفته شده است را به جز در همه مضرب‌های صحیح از ۵ کیلوهرتز، متناظر با $n=5K*PCI/1000$ ، حذف می‌کند. اما با دوره کدینگ فاز استاندارد PCI دامنه این خطوط طیفی به صورت رابطه (۲۶) به دست می‌آید:

از طرفی بزرگ‌ترین مقسوم‌علیه مشترک PCIها از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{cases} PCI_2 = 10 * 5930 * 2 = 593 * 5^2 * 2^3 \\ PCI_1 = 10 * 9960 * 2 = 83 * 5^2 * 3 * 2^5 \end{cases} \Rightarrow \gcd(PCI_1, PCI_2) = 5^2 * 2^3 = 200 \quad (19)$$

با توجه به اینکه PCIها بر حسب میکروثانیه هستند، بنابراین برای اینکه فرکانس $\frac{1}{\gcd(PCI_1, PCI_2)}$ بر حسب هرتز به دست آید دارید:

$$\frac{1}{\gcd(PCI_1, PCI_2)} = \frac{10^6}{200} = 5000 \text{ HZ} \quad (20)$$

و با توجه به اینکه $N_1 = f_s * PCI_1$ و $N_2 = f_s * PCI_2$ است بنابراین دارید:

$$\begin{aligned} \gcd(N_1, N_2) &= 5^2 * 2^3 * f_s = 200 * f_s \\ \Rightarrow \frac{1}{\gcd(N_1, N_2)} &= \frac{10^6}{200 * f_s} = \frac{5000}{f_s} \text{ HZ} \end{aligned} \quad (21)$$

با جایگذاری رابطه‌های (۲۱) و (۱۸) در رابطه (۱۶) دارید:

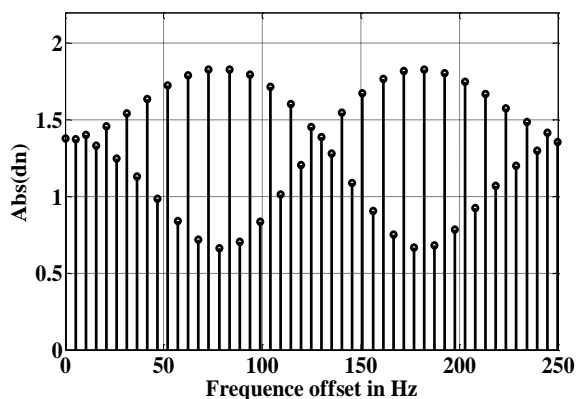
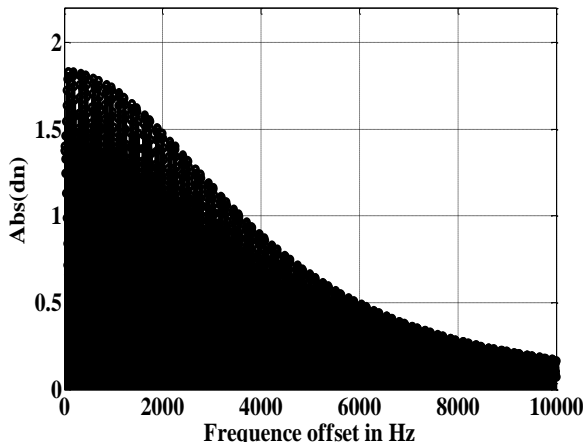
$$H_{Total}(Z) \Big| Z = e^{(jw)}, w = 2\pi \left(\frac{f}{f_s} \right), f = K * 8.39, \quad (22)$$

$$K \in Z = 0 \quad \text{If } f \text{ (HZ)} \neq 5000K$$

رابطه (۲۲) نشان می‌دهد فیلتر ترکیبی که برای حذف تداخل CRI ناشی از زنجیره مزاحم $GRI=5930$ بر روی زنجیره مورد نظر با $GRI=9960$ به کار می‌رود، دارای ضرایب صفر در تمامی فواصل فرکانسی به اندازه $8/39$ HZ است. از طرفی با توجه به رابطه (۱۲)، فاصله هر دو خط طیفی هم‌جوار در طیف لورن استاندارد به صورت $\frac{1000 * 1000}{PCI(1000m)}$ به دست می‌آید. بنابراین فاصله هر دو خط طیفی هم‌جوار در طیف لورن استاندارد برای $GRI=5930$ برابر با 8.39 HZ است. بنابراین فیلتر ترکیبی کار خود را به خوبی انجام می‌دهد و تمام خطوط طیفی زنجیره مزاحم را حذف می‌کند. در ادامه باید دید که فیلتر ارائه شده چه اثری بر روی زنجیره مطلوب با $GRI=9960$ می‌گذارد. مقدار N_1 با توجه به توضیحات رابطه (۱۸) به صورت رابطه (۲۲) به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} N_2 &= f_s * 10 * 9960 * 2 * 10^{-6} \\ &= \frac{f_s}{10^6} = \frac{f_s}{5.02 * 10 * 9960 * 2} \end{aligned} \quad (23)$$

مقیاس، مشاهده خطوط مجزا غیر ممکن است. شکل (۳-ب) بخشی از طیف ۱۰۰ تا ۱۰۰/۲۵ کیلوهرتز را برای دوره کدینگ فاز استاندارد نشان می‌دهد تا جزئیات دامنه‌های خطوط طیفی را مشخص نماید. البته سیگنال زنجیره‌های تداخلی لورن طیف مشابه دارند و تنها در فاصله‌گذاری و دامنه‌های خطوط به دلیل GRI متفاوت، متفاوت خواهند بود. از این تفاوت برای طراحی فیلتر و حذف تداخل CRI استفاده شده است.



شکل ۳. طیف سیگنال لورن استاندارد با GRI=9960 الف) طیف لورن استاندارد در باند ۱۰۰ تا ۱۱۰ کیلوهرتز برای زنجیره ۹۹۶۰ ب) بخشی از طیف لورن در باند ۱۰۰ تا ۱۰۰/۲۵ کیلوهرتز برای زنجیره ۹۹۶۰.

شکل (۴-الف) طیف خطی را برای زنجیره مزاحم ۵۹۳۰ نشان می‌دهد. خطوط مجزا در معکوس PCI که در این مورد ۸/۳۹ هرتز است، فاصله بندی می‌شوند. شکل (۴-ب) بخشی از طیف ۱۰۰ تا ۱۰۰/۲۵ کیلوهرتز را برای طیف مزاحم با GRI=۵۹۳۰ نشان می‌دهد تا جزئیات دامنه‌های خطوط طیفی را به دلیل کدینگ فاز استفاده شده مشخص نماید. همان‌طور که مشخص است فاصله بین هر خط طیفی با خط طیفی هم‌جوار خود ۸/۳۹ هرتز است.

$$d_n = c_n \sum_{m=0}^{15} b_m e^{-j 2\pi n \tau_m / PCI} \quad (26)$$

$$= c_n \begin{pmatrix} (b_0 \pm b_8) + (b_1 \pm b_9) e^{-j 2\pi 5K} \\ + (b_2 \pm b_{10}) e^{-j 2\pi 10K} + (b_3 \pm b_{11}) e^{-j 2\pi 15K} \\ + (b_4 \pm b_{12}) e^{-j 2\pi 20K} + (b_5 \pm b_{13}) e^{-j 2\pi 25K} \\ + (b_6 \pm b_{14}) e^{-j 2\pi 30K} + (b_7 \pm b_{15}) e^{-j 2\pi 35K} \end{pmatrix}$$

همه نمایه‌های این عبارت، مضرب‌های صحیحی از 2π هستند (بنابراین مساوی واحد)، به این ترتیب با ساده‌سازی به عبارت نسبتاً ساده کاهش می‌یابد:

$$d_n = \sum_{m=0}^7 b_m \pm \sum_{m=8}^{15} b_m \quad (27)$$

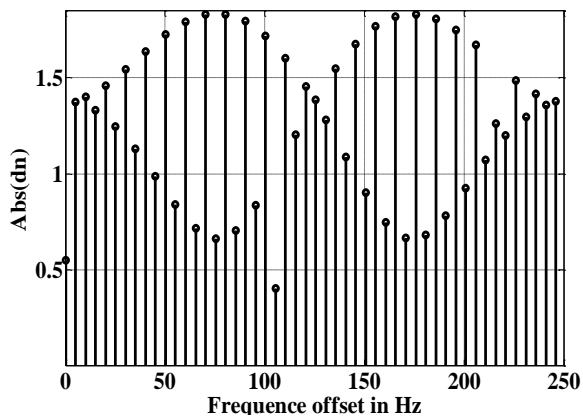
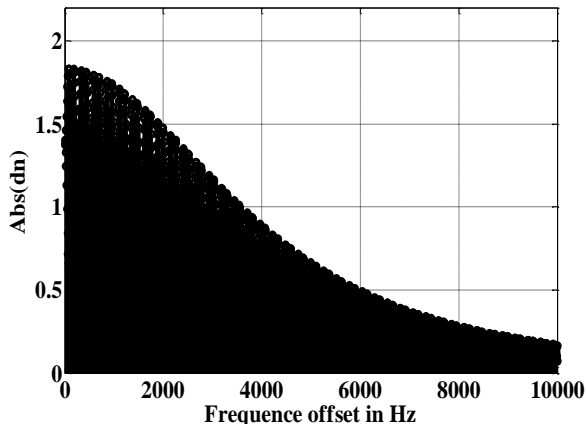
بنابراین در این حالت اگر کدینگ فاز در دو نصفه مجزا متعادل بود، b_0 تا b_7 و b_8 تا b_{15} ، آنگاه d_n برابر صفر می‌شد. به بیان دیگر در این حالت تمامی خطوط مربوط به معکوس بزرگ‌ترین مقسوم‌علیه مشترک دو زنجیره که مضارب صحیحی از ۵ کیلوهرتز هستند، متناظر با $n=5m*PCI/1000$ حذف می‌شود. اما دوره کدینگ فاز کنونی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

۵. نتایج شبیه‌سازی

در این بخش طیف خطی برای زنجیره با GRI‌های ۹۹۶۰ و ۵۹۳۰ با فرض اینکه زنجیره اصلی ۹۹۶۰ است و زنجیره ۵۹۳۰ تداخل CRI ایجاد می‌کند، قبل از استفاده از فیلتر ترکیبی شکل (۲) و همچنین در خروجی فیلتر، برای کدینگ فاز لورن استاندارد (PCI) نمایش داده شده است. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد، زمانی که از فیلتر پیشنهادی استفاده می‌شود در خروجی فیلتر تمامی خطوط طیفی زنجیره تداخلی ۵۹۳۰ به جز خطوط طیفی مشترک در دو زنجیره به طور کامل حذف می‌گردد.

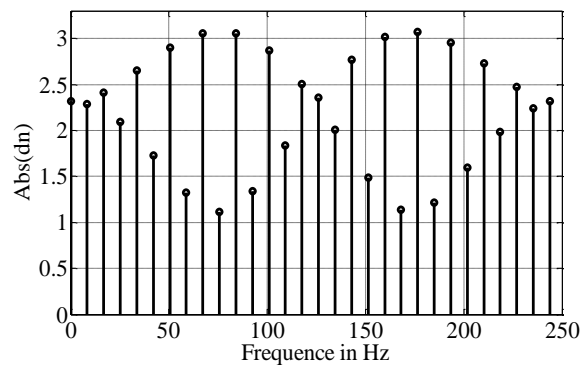
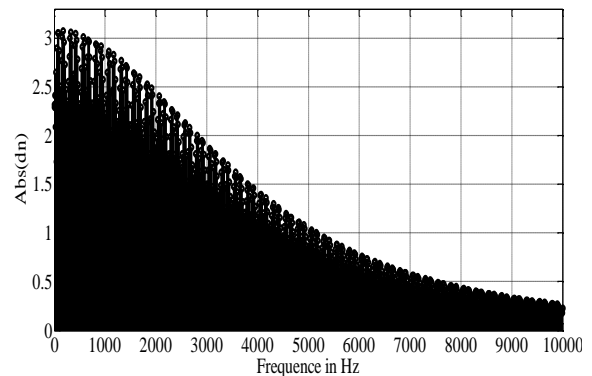
شکل (۳-الف) طیف خطی را برای زنجیره ۹۹۶۰ و کدینگ فاز استاندارد نشان می‌دهد. خطوط مجزا در معکوس PCI، که در این مورد ۵/۰۲ هرتز است فاصله بندی می‌شوند. به جای نشان دادن طیف کامل، این شکل شامل دامنه باند جانبی بالاتر از ۱۰۰ کیلوهرتز تا ۱۱۰ کیلوهرتز است، که پهنای باند لورن می‌باشد (محور با انحراف از ۱۰۰ کیلوهرتز پارامتری شده است). در این

شکل (۶) طیف به‌دست آمده در خروجی فیلتر برای زنجیره ۹۹۶۰ را نشان می‌دهد. با مقایسه شکل (۶) با شکل (۳) مشاهده می‌شود روال کلی هر دو طیف مشابه است و تغییر بسیار محدودی در دامنه‌های خطی مجزا دیده می‌شود. بنابراین پس از حذف تداخل به کمک فیلتر ارائه شده، یک پالس بازسازی شده از این طیف خروجی، غیر قابل تشخیص از پالس عادی لورن است.



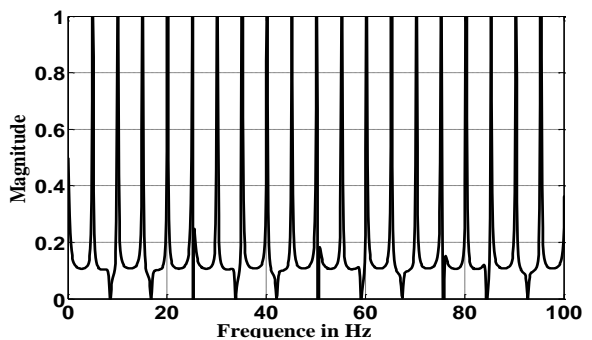
شکل ۶. جزئیات طیف سیگنال خروجی فیلتر برای سیگنال ورودی با $GRI=9960$ (الف) طیف سیگنال خروجی (ب) فاصله بین $100/25$ - 100 کیلوهرتز

شکل (۷) طیف دامنه سیگنال مزاحم با $GRI=5930$ را پیش از فیلترینگ و پس از آن برای دوره کدینگ فاز استاندارد نشان می‌دهد. مشخص است شکاف (notch)، کار خود را انجام داده است، که همه خطوط سیگنال زنجیره مزاحم به جز خطوط مشترک با طیف زنجیره اصلی با $GRI=9960$ به صفر می‌رسند (خطوط باقی مانده در 0 و ± 5000 و ± 10000 و ± 15000 و ... از 100 کیلوهرتز هستند). این باقی‌مانده، کوچک است، چرا که فقط چند خط از بین بی‌نهایت خط اصلی است.



شکل ۴. طیف سیگنال لورن استاندارد با $GRI=5930$ (الف) طیف لورن استاندارد در باند 100 تا 110 کیلوهرتز برای زنجیره 5930 (ب) بخشی از طیف لورن در باند 100 تا $100/25$ کیلوهرتز برای زنجیره 5930

برای بهبود دریافت سیگنال مطلوب، از فیلتر شکل (۲) استفاده می‌شود. شکل (۵) بخشی از دامنه پاسخ فرکانسی فیلتر را برای سیگنال مطلوب 9960 و سیگنال تداخلی 5930 نشان می‌دهد (این شکل گستره محدود دارد تا تأثیرات شانه و شکاف را در نشان دهد). توجه کنید فیلتر، خطوط طیفی $GRI=9960$ را در فاصله‌های تقریباً 5 هرتز عبور می‌دهد و تلاش می‌کند خطوط طیفی زنجیره تداخلی $GRI=5930$ را با فاصله تقریباً $1/4$ هرتز کنسل کند.

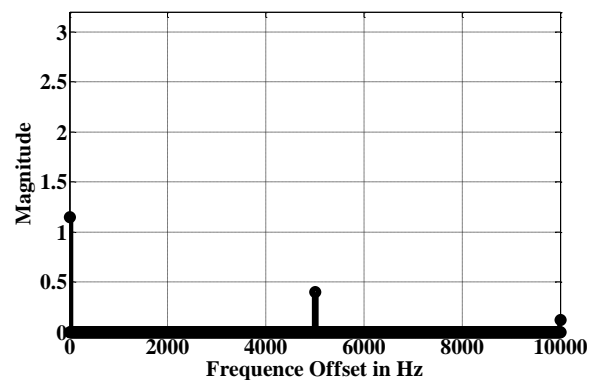
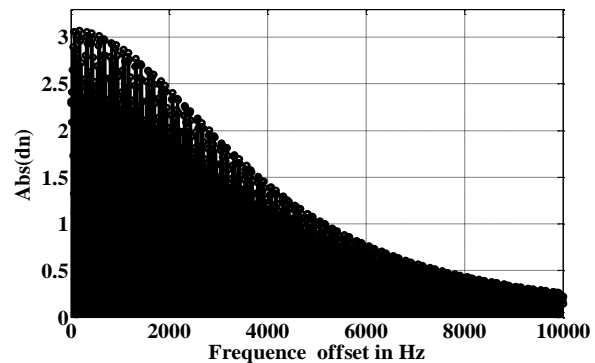


شکل ۵. دامنه پاسخ فرکانسی فیلتر طراحی شده برای سیگنال ورودی مطلوب با $GRI=9960$ و حذف سیگنال تداخلی با $GRI=5930$

زیادی بهبود بخشید. در واقع با حذف خطوط طیفی زنجیره داخلی و تقویت خطوط طیفی زنجیره اصلی با استفاده از یک فیلتر ترکیبی، در تمامی نقاط به جز ضرایب صحیح از فرکانس بزرگ‌ترین مقسوم‌علیه مشترک دو دوره کدینگ فاز، تداخل حذف می‌شود. نتایج نشان می‌دهد، فیلتر ترکیبی کار خود را به خوبی انجام می‌دهد و تداخل ناشی از زنجیره مزاحم را تقریباً به طور کامل حذف می‌نماید. این در حالی است که هیچ اثر مخربی بر روی طیف سیگنال زنجیره مطلوب ندارد. از طیف به‌دست آمده در خروجی می‌توان پالس‌های لورن بدون تداخل CRI را استخراج نمود.

۷. مراجع

- [1] Manish, L. "Characterization of Atmospheric Noise and Precipitation Static in the Loran-C Band for Aircraft"; M.Sc. Thesis, Ohio University, Athens, OH, 2004.
- [2] Beckmann, M. "Synchronous Interference to Loran-C and its Influence on Cycle Identification"; Proc. Int. Conf. the Wild Goose Association, 1990, 105-113.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Narins, M. "Alternative Positioning, Navigation, and Timing Initiative Assumptions and Requirements"; Proc. Int. Meeting FAA APNT Public, 2010, 41-49.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Xi, X.; Zhou, L.; Zhang, J.; Liu, J. "Combined IE-FDTD Algorithm for Long-Range Loran-C Ground-Wave Propagation"; IEEE Trans. Antennas Propag. 2012, 64, 3802-3808.
- [10] Meng, Q.; Zhou, X.; Liu, H. "Noise Suppression Technique by Adaptive Filter in Loran-C Receiver"; J. Modern Electron. Tech. 2007, 31, 5-9.
- [11] Lin, H.; Zhou, H.; Liu, F. "Research on Phase Coding Identification of Loran-C Signal Under the Background of Strong CWP"; J. Test. Meas. Tech. 2012, 52, 252-255.
- [12] Lombardi, M. A. "Microsecond Accuracy at Multiple Sites: Is it Possible without GPS"; IEEE Instrum. Meas. Mag. 2012, 64, 14-21.
- [13] Cahn, C. R. "A Note on Signal-to-Noise Ratio in Band-Pass Limiters"; IRE Trans. Information Theory 1961, 7, 39-43.



شکل ۷. طیف سیگنال تداخلی لورن با $GRI=5930$ (الف) پیش از فیلترینگ (ب) پس از فیلترینگ

همان‌طور که از شکل‌های (۳) تا (۷) مشخص است فیلتر ترکیبی کار خود را به خوبی انجام می‌دهد و تداخل ناشی از زنجیره مزاحم را تقریباً به طور کامل حذف می‌نماید. این در حالی است که هیچ اثر مخربی بر روی طیف سیگنال زنجیره مطلوب ندارد.

۶. نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین منابع خطا در سامانه‌های لورن، تداخل ناشی از روی هم افتادگی پالس‌های دریافتی از دو زنجیره متفاوت لورن (CRI) است. استخراج اطلاعات مربوط به تعیین موقعیت از اندازه‌گیری‌های TOA که تحت تأثیر CRI قرار گرفته‌اند، باعث کاهش دقت ناوبری و افزایش چشمگیر زمان دریافت کلی در سامانه لورن می‌شود. علاوه بر این هنگامی که سیگنال‌های داخلی با هر سیگنال مطلوبی هم‌پوشانی داشته باشد، احتمال دریافت سیگنال مطلوب کاهش می‌یابد. در این مقاله به تحلیل بهبود کارایی سامانه لورن در حذف تداخل نرخ متقابل با استفاده از یک فیلتر ترکیبی و تحلیل سیگنال در حوزه فرکانس پرداخته شد. با استفاده از روش پیشنهادی، بدون از دست دادن اطلاعات و یا افزایش زمان جستجو می‌توان تأثیرات CRI بر روی سامانه لورن را حذف و دقت اندازه‌گیری‌های مربوط به TOA را تا میزان

- [23] 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.
- [24] Van Der Wal, P. W.; Van Willigen, D. "Hard Limiting and Sequential Detection Applied to Loran C"; IEEE Trans. Aerosp. Electron. Sys. 1978, 64, 649-661.
- [25] Frank, R. L. "Multiple Pulse and Phase Code Modulations in the Loran C System"; IEEE Trans. Aeronaut. Navig. Electron. 1960, 7, 55-61.
- [26] Zhou, X.; Meng, Q.; Liu, H. "Noise Suppression Technique in Loran-C Receivers"; J. Chong. Univ. Sci. Tech. 2008, 22, 82-87.
- [27] Lu, W.; Xue, L.; Liu, X. "Analysis of Carrier Wave Interference Suppression in Loran-C Receiver"; J. Ship Elec. Eng. 2006, 9, 77-79.
- [28] Wei, X.; Yan, L.; Qing, L. "Loran-C Synchronous Interference Suppression Using Improved Adaptive Algorithms"; IEEE Trans. Audio, Speech, Language Process. 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] Lee, C. O.; Boyce, Jr. "Atmospheric Noise Mitigation For Loran"; Ph.D. Thesis, Stanford University, Medford, MA, 2007.
- [14] Peter, F.; Swaszek, L. "Loran Phase Codes Revisited"; Position, Location and Navigation Symposium, IEEE/ION, 2008, 30-37.
- [15] Jones, J. J. "Hard Limiting of Two Signals in Random Noise"; IEEE Trans. Information Theory 1963, IT-9, 34-42.
- [16] 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.
- [17] Joglekar, A.; Gupta, J.; Ylvisaker, I. "Evaluation of Loran C for Domestic Air Navigation"; Report No. MTR-7180, the MITRE Corporation, McLean, VA, 1976.
- [18] 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.
- [19] Sperry G. C. "Cross-Chain Interference Study"; U.S. Coast Guard Contract TCG-59,380-A, 1964.
- [20] 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.
- [21] ITT Federal Labs. "Cross-Rate Interference Study"; U.S. Coast Guard Contract TCG-59, 380-1A, Nov. 1963.
- [22] 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.