

بهبود الگوریتم گیرنده داده لورن برای کانال‌های نویزی

احمد عفیفی^۱، اباذر خرمی^۲، سعید علیخانی^۳

^۱دانشیار دانشگاه صنعتی مالکاشتر، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر afffi@mut.ac.ir

^۳کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی مالکاشتر، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر

^۲دکتری دانشگاه جامع امام حسین(ع)، دانشکده و پژوهشکده سایبرالکترونیک

چکیده

در سامانه موقعیت یاب لورن بهبود یافته، با اضافه کردن پالس نهم به زنجیره سیگنال ارسالی می‌توان پیام‌های مختلفی را از طریق مدولاسیون مکان این پالس و کدینگ ریدسولومون ارسال نمود. گیرنده باید بتواند مکان پالس نهم را با خطای کمتر از $1\mu\text{sec}$ به منظور به دست آوردن پیام تخمین بزند. برای این کار از روش‌های استخراج زمان عبور از صفر پالس‌های هشتم و نهم زنجیره استفاده می‌شود. در این مقاله الگوریتمی به منظور بهبود عملکرد گیرنده کانال داده لورن جهت دریافت پیام‌ها در کانال نویزی AWGN ارائه شده است که در آن به جای استفاده از دو پالس، از تمامی نه پالس GRI برای تخمین مکان پالس نهم استفاده می‌شود و با استفاده از روش مقایسه و بیشترین تکرار از هشت تأخیر به دست آمده، مکان پالس نهم استخراج می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد با استفاده از این الگوریتم امکان دریافت صحیح پیام‌ها با احتمال خطای بیت کمتری نسبت به روش‌های رایج HCPR به خصوص در سیگنال‌های نویزهای پایین وجود دارد. به طور نمونه، نرخ احتمال خطای بیت در الگوریتم پیشنهادی در SNR حدود 0dB کمتر از 10% درصد است.

کلیدواژه

لورن بهبود یافته، کانال داده، مدولاسیون مکان پالس، گدگذار رید-سولومون

مقدمه

لورن^۱ یک سامانه موقعیت‌یابی زمین‌پایه است. با توجه به پایین بودن فرکانس و قدرت انتقال آن، دارای برد طولانی می‌باشد و کاربران در فاصله بیش از 800km هم می‌توانند سیگنال لورن را از حداقل سه ایستگاه فرستنده دریافت نموده و بر اساس اختلاف زمانی بین پالس ایستگاه اصلی و پالس‌های ایستگاه ثانویه، موقعیت خود را تعیین نمایند [1].

پس از توسعه سامانه ناوبری جهانی^۲، دقت کم لورن نسبت به سامانه مذکور باعث کاهش تعداد کاربران لورن شد. سامانه GPS خدمات بیشتری را با قیمت ارزانی ارائه می‌کرد به گونه‌ای که ناوبری فدرال ایالات متحده آمریکا در سال 1994 تصمیم به حذف سامانه لورن تا سال 2000 گرفت اما این طرح پس از تأیید آسیب‌پذیری GPS تغییر کرد و به کاربرد و بررسی توسعه سامانه لورن به عنوان پشتیبان GPS مورد تأکید قرار گرفت [2-6].

با از سر گرفته شدن تمایلات به استفاده از این سامانه و ارتقاء و بهبود عملکرد نام آن به لورن بهبود یافته^۳ تغییر کرد [5]. در سال 2004 مطرح شد که سامانه لورن توانایی چیره شدن بر

کاستی‌های GPS را دارد و با سه ویژگی دقت بهتر از 20m ، فراهم کردن یک منبع مستقل برای زمان هماهنگ‌شده جهانی^۴ و اضافه شدن کانال داده با استفاده از پالس نهم برای ارسال انواع داده به عنوان پشتیبان GPS مطرح گردید [7]. سامانه eLoran مشتمل بر فرستنده‌های پر قدرت چند مگاواتی زمین‌پایه، آنتن‌های زمینی، مکانیزم‌های هم‌زمانی فرستنده‌ها با قدرت چند نانو ثانیه و گیرنده‌های لورن است امکان مکان‌یابی امن اشیاء ثابت و متحرک با دقت بالا و به صورت آنی با حفظ قابلیت عملکرد تجهیزات در شرایط بحران را در اختیار قرار می‌دهد [4-7]. تمام ایستگاه‌های فرستنده به تقویت‌کننده‌های ترانزیستوری حالت جامد و تجهیزات فرکانسی و زمانی برای کنترل زمان انتقال مجهز شده‌اند [8-10].

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های لورن بهبود یافته اضافه شدن کانال داده لورن^۵ است [11]. در سامانه مذکور با اضافه کردن پالس نهم به زنجیره‌ها با حفظ عملکرد موقعیت‌یابی، پیام‌های مختلفی از طریق مدولاسیون مکان پالس نهم و با استفاده از گدگذار ریدسولومون جهت تشخیص و تصحیح خطا ارسال می‌شود.

^۴ UTC: Universal Time Coordinated

^۵ LDC: Loran Data Channel

^۱ Loran: Long Range Navigation

^۲ GPS: Global Positioning System

^۳ eLoran: Enhanced Loran

اولین چالش در مورد این نوع از مدولاسیون تأثیر آن‌ها روی گیرنده‌های قبلی بود. هرچند با استفاده از این سامانه‌ها به متوازن‌سازی روش‌های مدولاسیون موقعیت پالس کمک شد اما این سامانه‌ها نتوانستند همه ناپایداری‌های اضافی در زمان دریافت سیگنال‌ها که ناشی از مدولاسیون داده بود را حذف کنند. در واقع این کار منجر به ایجاد خطا در تعیین موقعیت کاربر به عنوان اصلی‌ترین کاربرد سامانه می‌شد. به‌علاوه حرکت و تأخیر فزاینده توان متوسط سیگنال را کاهش می‌داد که از نظر ناوبری این یک اثر جانبی نامطلوب بود که منجر شد توانایی فرستنده‌های لورن برای رفع این مشکلات در روش‌های مدولاسیون زیر سؤال برود. بر این اساس ایده اضافه کردن پالس نهم پس از هشت پالس ناوبری در یک گروه مطرح شد. این ایده سه ویژگی مهم دارد. اول، افزودن پالس نهم اثر ناچیزی روی سیگنال عملیاتی لورن دارد. دوم، مدیریت اثر نرخ متقاطع حاصل از افزودن پالس نهم نسبت به دیگر تکنیک‌ها راحت‌تر است. در گیرنده‌ها هنگامی که پالس‌های هشت‌گانه ناوبری کنسل شوند، پالس نهم در نرخ متقاطع پاک خواهد شد و افزودن پالس نهم تنها 0/5dB به نرخ متقاطع اضافه می‌کند. سوم، اعمال مدولاسیون با استفاده از نُه پالس به راحتی با تجهیزات زمانی و فرکانسی لورن کنونی و فرستنده‌ها قابل انجام می‌باشد. همچنین فرستنده به تغییرات گسترده در شبکه خروجی نیاز ندارد. پیچیدگی نرم‌افزار کنترل به میزان قابل توجهی کاهش یافته و می‌تواند بدون تغییرات عمده در تجهیزات فرکانس و زمان‌بندی و همچنین کنترل فرستنده‌های جاری پیاده‌سازی شود و پیچیدگی گیرنده بدون از بین رفتن داده‌ها به میزان زیادی کاهش یافته است.

برای این‌که سامانه لورن بتواند به‌عنوان یک پشتیبان مطمئن برای GPS عمل کند، باید پیام‌های کاربردی و اصلاحی لازم را برای کاربران فراهم آورد [18]. همچنین می‌توان دقت لورن را با استفاده از تصحیحات تفاضلی بالا برد و با شناسایی ایستگاه، امکان بهبود زمان‌بندی مناسب فراهم می‌شود [17-18]. از طرف دیگر ارسال انواع پیام در بهبود عملکرد گیرنده مفید است. برای برآورده کردن این الزامات، نیاز به یک مجموعه داده یکپارچه می‌باشد. تحلیل‌های اولیه نشان می‌دهد که یک نرخ داده در حدود 30 الی 50 بیت در ثانیه می‌تواند تمامی این نیازها را برآورده کند. در سامانه لورن اولیه ایستگاه اصلی نُه پالس و ایستگاه‌های ثانویه هشت پالس را مخابره می‌نمایند که نقطه شروع هشت پالس 1msec و نقطه شروع پالس هشتم و نهم 2msec فاصله دارد. پالس نهم جهت ارسال پیام از طریق مدولاسیون مکان پالس با حفظ عملکرد موقعیت‌یابی به سامانه

فرستنده پیام‌ها را تولید و از طریق کانال داده برای گیرنده ارسال می‌کند و گیرنده به‌منظور به‌دست آوردن پیام باید بتواند مکان پالس نهم را با خطای کمتر از 1μsec تخمین بزند [12]. در ابتدا برای این منظور شروع پالس هشتم و سپس شروع پالس نهم محاسبه می‌گردد و سپس از اختلاف مکان این دو پالس مکان صحیح پالس نهم با روش‌هایی از قبیل HCPR⁶ و یا روش تأخیر و اضافه تخمین زده می‌شود [13-17].

از طرف دیگر، روش‌های موجود که مبتنی بر محاسبه تأخیر بین پالس هشتم و نهم هستند قادر به بررسی صحت تأخیر به‌دست‌آمده نمی‌باشند. در این مقاله برای حل مشکل مذکور و بهبود تخمین مکان پالس نهم سه الگوریتم ارائه می‌شود. به کمک الگوریتم‌های پیشنهادی تخمین مکان پالس نهم به‌منظور بهبود عملکرد گیرنده کانال داده لورن جهت دریافت پیام‌ها در کانال نویزی AWGN⁷ مهیا خواهد شد. این الگوریتم‌ها از اطلاعات کلی یک شکل پالس برای افزایش دقت استفاده می‌کنند.

بخش دوم مقاله به بررسی کانال داده در eLoran می‌پردازد. در بخش سوم روش‌های موجود برای تخمین مکان پالس لورن معرفی می‌شود. بخش چهارم روش پیشنهادی این پژوهش جهت بهبود تخمین مکان پالس نهم را ارائه می‌دهد و در بخش پایانی نتایج حاصل از شبیه‌سازی روش‌های ارائه شده و روش HCPR در کانال AWGN مورد بررسی قرار می‌گیرد.

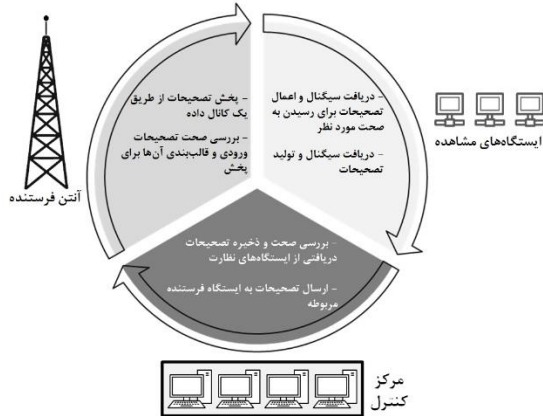
مشخصات کانال داده در eLoran

مدولاسیون داده لورن اولین بار در دهه 1960 توسط پاسگان ساحلی ایالات‌متحده در برنامه‌ای تحت عنوان کلارینت مطرح شد که در آن از مدولاسیون مکان پالس⁸ دوتایی با جابجایی پالس لورن به مقدار $\pm 1\mu\text{sec}$ استفاده می‌شد. بعدها در دهه 1990 مدولاسیون سه‌تایی با انتقال شش پالس از هشت پالس لورن به مقدار $\pm 1\mu\text{sec}$ پیاده‌سازی شد که با این کار نرخ داده تا 30bit/sec افزایش یافت. در اوایل دهه 2000 میلادی روش دیگری برای ارسال داده از طریق مدولاسیون فاز/فرکانس تحت عنوان مدولاسیون فرکانس درون پالسی⁹ روی شش پالس از هشت پالس ارائه شد. در این روش از شکل موج 16 پالسی استفاده می‌شد که در آن مدولاسیون در نقطه 30μsec انجام می‌گرفت تا کمترین اثر را بر کارایی ناوبری داشته باشد. در آزمایش‌های انجام‌شده این سامانه توانست به نرخ داده 250bit/sec برسد [18].

⁸ PPM: Pulse Position Modulation
⁹ IFM: Intrapulse Frequency Modulation

⁶ HCPR: Half-Cycle Peak Ratios
⁷ AWGN: Additive White Gaussian Noise

استفاده از سیگنال‌های در دسترس به دست آید. گیرنده قادر است پیام‌های کانال داده را دریافت و کدبرداری کند و این اطلاعات را بر اساس کاربرد خاص کاربران اعمال نماید که در شکل 3 نشان داده شده است. این اطلاعات با تصحیحات انتشار سیگنال منتشر شده ترکیب شده و کاربران را به موقعیت‌یابی، جهت‌یابی و تعیین زمان^{۱۲} با دقت بسیار بالا مجهز می‌کند.

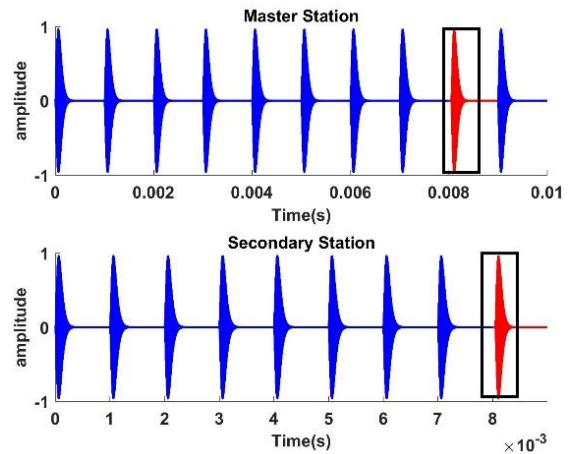


شکل 3. پیام‌های کانال داده

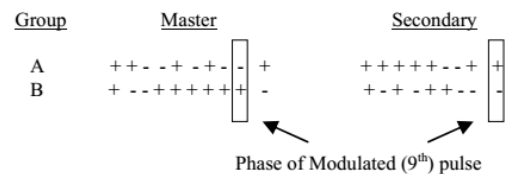
ارتقاء دیگر این سامانه ارسال اصلاحات بلادرنگ و پیام‌های اختار است. یک شبکه از سایت‌های نمای‌شگر و ایستگاه‌های مرجع در منطقه پوشش، عملکرد آن را تحت نظر گرفته و در صورت مشاهده و آشکارسازی پدیده‌های غیرعادی، بلادرنگ پیام‌های اختار را تولید می‌کنند. به علاوه، ایستگاه‌های مرجع پیام‌های تصحیحی ایجاد می‌کند که از طریق کانال داده از سال می‌شوند. این پیام‌های تصحیح به مقدار قابل توجهی عملکرد سامانه را بهبود می‌دهد.

بلوک دیاگرام فرستنده و گیرنده کانال داده لورن در شکل 4 آمده است. همان‌طور که از این شکل پیداست در ابتدا فرستنده پیام‌های استاندارد را تولید می‌کند. یک پیام لورن شامل پنج بخش و در مجموع ۱۲۰ بیت است. این بیت‌ها طی ۲۴ گروه پالسی پنج‌بیتی (۲۴ سیمبل) ارسال می‌شود. زمان ارسال این ۲۴ گروه پالسی وابسته به زمان GRI^{۱۲} بوده و حداکثر 2.4sec به طول می‌انجامد. مطابق با جدول ۱ بخش اول پیام (۴ بیت اول) نوع پیام را مشخص می‌کند. با استفاده از 4 بیت ۱۶ نوع پیام متفاوت از این طریق قابل ارسال است که مطابق با جدول 2 تاکنون تنها پنج نوع پیام استاندارد برای کانال داده تعریف شده است. بخش دوم پیام که ۴۱ بیت می‌باشد داده‌های اصلی پیام که وابسته به نوع پیام می‌باشد را تشکیل می‌دهد و در نهایت بخش سوم مربوط به کدگذاری پیام به منظور تشخیص و تصحیح خطا در گیرنده می‌باشد و طول آن ۷۵ بیت است. فرستنده با

اضافه شده است. شکل 1 موقعیت پالسی نهم مدوله شده در گروه لورن استاندارد را نشان می‌دهد. همچنین در شکل 2 کدگذاری فاز برای دو گروه پالسی A و B آمده است. همان‌طور که در این شکل مشخص گردیده کد فاز پالسی نهم مشابه با پالسی هشتم می‌باشد [18].



شکل ۱. موقعیت پالسی نهم در سامانه eLoran



شکل ۲. کدگذاری فاز پالسی‌های eLoran

کانال داده، مهم‌ترین ارتقاء لورن بهبود یافته نسبت به نسخه‌های قبلی است. این کانال برای موقعیت‌یابی و پیام‌های زمانی است و کاربر را قادر می‌سازد تا به جای TDOA^{۱۰} از TOA^{۱۱} استفاده کند. در TOA زمان رسیدن هر سیگنال برای محاسبه شبه‌فاصله بین گیرنده و فرستنده استفاده می‌شود. با استفاده از شبه‌فاصله سه ایستگاه فرستنده متفاوت، می‌توان موقعیت دوبعدی و زمان دقیق را محاسبه کرد. تفاوت آن‌ها در این است که با استفاده از TOA می‌توان از هر ایستگاه فرستنده‌ای برای موقعیت‌یابی استفاده است در حالی که در TDOA تنها ایستگاه‌های درون یک زنجیره قابل استفاده هستند. حتی در صورتی که سیگنال‌های قوی‌تر و واضح‌تری از دیگر زنجیره‌ها دریافت شود، سامانه TDOA لورن را محدود به استفاده از سیگنال‌های مربوط به یک زنجیره می‌کند. TOA گیرنده را قادر می‌سازد که از این سیگنال‌ها نیز بهره‌گیری کند. به این ویژگی "همه‌دردید" گفته می‌شود که کمک خواهد کرد دقیق‌ترین و قابل‌اعتمادترین موقعیت و زمان با

GRI فاصله زمانی بین شروع یک انتقال از زنجیره لورن C اصلی و شروع انتقال بعدی برحسب میکروثانیه است.

¹⁰ TDOA: Time Difference Of Arrival

¹¹ TOA: Time Of Arrival

¹² PNT: Positioning, Navigation and Timing

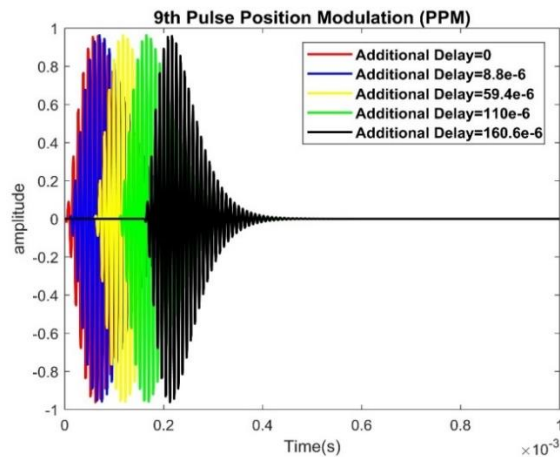
¹³ GRI: Group Repetition Interval

محتویات به چند زیرمجموعه تقسیم می‌شود. به‌عنوان مثال زیرمجموعه اول و دوم پیام به ترتیب دربرگیرنده عرض و طول جغرافیایی ایستگاه مرجع می‌باشد. پیام زمانی شامل نوع پیام، مشخصات ایستگاه، تعیین ثانیه کبیسه و تعداد ثانیه‌های آن است. هشدار تعیین ثانیه کبیسه وقتی به کار گرفته می‌شود که یک ثانیه جدید در پایان سال جاری به ساعت افزوده شود و زمان به شکل عدد 31 بیتی از ساعت صفر در یکم ژانویه 1958 محاسبه می‌گردد. همچنین دو نوع پیام رزرو پیش‌بینی شده که مخصوص دولت آمریکا می‌باشد و هیچ اطلاعاتی از این دو پیام در دسترس نیست. [20-21].

میزان تأخیر بین پالس هشتم و نهم شامل اطلاعات داده‌ها است. حداقل زمان تأخیر 1000µsec و حداکثر 1160.6µsec بعد از پالس هشتم می‌باشد. در هر GRI می‌توان 5 بیت داده (32 حالت مختلف) برای پالس نهم انتقال داد. شکل 5 مدولاسیون مکان پالس لورن را نشان می‌دهد. مقدار تأخیر ایده‌آل بر حسب سیمبل در رابطه (2) آمده است.

$$d_i = 1/25 \times \text{mod}(i, 8) + 50 / 625 \times \text{floor}\left(\frac{i}{8}\right) \quad (2)$$

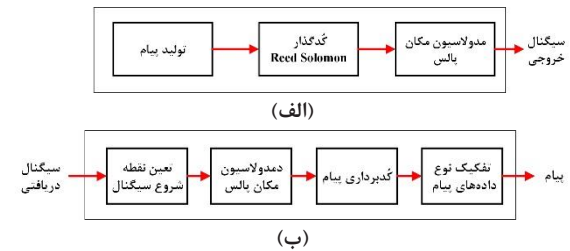
در این رابطه d تأخیر بر حسب میکروثانیه و i شمارنده از 0 تا 31 می‌باشد. همچنین mod و floor به ترتیب بیانگر باقیمانده و گرد کردن حاصل تقسیم i به 8 است.



شکل 5. مدولاسیون مکان پالس

به دلیل وجود نویز و تداخل در کانال، نیاز به تشخیص و تصحیح خطای داده‌های دریافتی است. از این رو در سامانه eLoran از روش تصحیح خطا روبه‌جلو RS-FEC¹⁶ استفاده می‌شود. کُدگذاری RS به‌طور مؤثری از داده‌ها در برابر اختلالات احتمالی و ناشناخته کانال محافظت می‌کند [18]. کانال داده لورن دارای کُد RS(31,16) با 31 سیمبل (45 بیت داده، 35 بیت صفر اضافه و 75 بیت توازن) است که سیمبل‌های آن 5 بیتی هستند. فرستنده فقط برای تولید بیت‌های توازن 7 سیمبل صفر را به پیام

اضافه کردن پالس نهم از طریق مدولاسیون مکان این پالس، داده‌های دلخواه را مدوله و از سال می‌کند. پالس مذکور کاربردی در موقعیت‌یابی ندارد و فقط برای ارسال داده استفاده می‌شود. در گیرنده، کانال داده باید مکان پالس نهم را با کمترین خطا تخمین بزند و از روی داده‌های به‌دست‌آمده عملیات کُدبرداری را انجام داده و در نهایت بر اساس نوع پیام ارسالی، پیام اصلی را به‌دست‌آورد [19].



شکل 4. بلوک دیاگرام کانال داده لورن الف- فرستنده ب-گیرنده جدول 1. بیت‌های ارسالی کانال داده در فرستنده لورن [19]

بخش	نوع پیام	پیام اصلی	بیت‌های توازن
طول داده (بیت)	4	41	75
بیت‌های تخصیصی	[0-3]	[4-44]	[45-119]

جدول 2. انواع پیام تعریف‌شده در کانال داده لورن [19]

شماره	کُد نوع پیام	توضیحات
0	0000	پیام تصحیح فاز سایت مرجع
1	0001	پیام تقویمی
2	0010	پیام رزرو شده
3	0011	پیام رزرو شده
4-14	-0100 1110	تعریف‌نشده
15	1111	پیام زمانی

مقدار نرخ انتقال داده¹⁴ کانال از رابطه 1 به‌دست می‌آید [19].

$$BPS = \frac{5 \times 10^6}{GRI \times 10} \quad (1)$$

بر اساس رابطه اخیر و مقدار GRI، نرخ انتقال داده می‌تواند بین 50 تا 100 بیت در هر ثانیه باشد.

در جدول (2) پیام تصحیح‌کننده فاز متشکل از داده اصلاحی فاز ASF¹⁵ از یک سایت مرجع تفاضلی است. هدف از این پیام کاهش عناصر موقت ASF می‌باشد. اصلاح، متناظر با مقدار اسمی مشخص‌شده در کالیبراسیون اعمال می‌گردد. مقادیر اسمی منتشر شده برای سایت‌های مرجع در مرکز ناوبری گارد ساحلی و یا از طریق پیام‌های تقویمی در دسترس خواهد بود. پیام تقویمی شامل داده تقویمی گسترده‌ای است که برای گیرنده بسیار مفید می‌باشد. این پیام برای انتقال اطلاعات به‌روز شده سامانه به کاربر مورد استفاده قرار می‌گیرد. به دلیل حجم بالای داده موردنیاز در پیام تقویمی، اطلاعات با توجه به

¹⁶ RSFEC: Reed Solomon Forward Error Correction

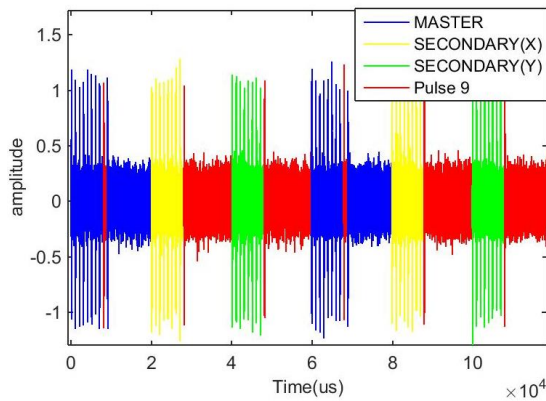
¹⁴ BPS: Bit Per Second
¹⁵ ASF: Additional Secondary Factors

ب- الگوریتم Delay-and-Add

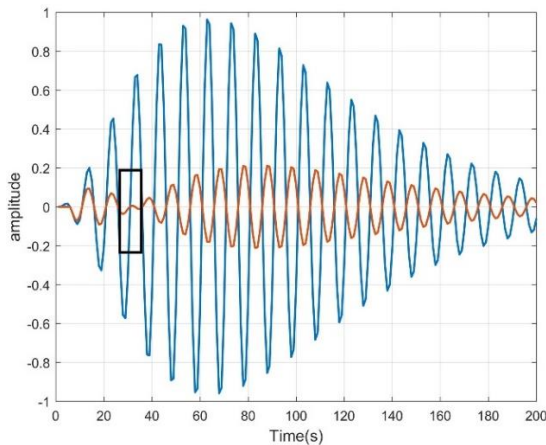
این روش، پیاده‌سازی خاصی از HCPR است. اگر فرض شود $y(t)$ سیگنال دریافتی باشد، یک سیگنال ترکیبی به صورت رابطه (5) در گیرنده ساخته می‌شود به طوری که $h(30)$ همان HCPR در عبور از صفر استاندارد باشد.

$$z(t) = y(t + \tau/\delta) + y(t - \tau/\delta) \times h(\tau) \quad (5)$$

تابع $z(t)$ در شکل 8 نشان داده شده است که در آن هر عبور از صفر پائین-به-بالا سیگنال RF با علامت + مشخص شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود فاز $z(t)$ در نقطه عبور از صفر استاندارد معکوس می‌شود. این امر به سادگی در گیرنده قابل آشکارسازی است چراکه عبور از صفرهای مشخص شده در $z(t+\delta)$ و $z(t-\delta)$ دارای علامت‌های متفاوت می‌باشند [24].



شکل 7. بزرگنمایی GRIA و GRIB



شکل 8. شبیه‌سازی نمودار تابع $z(t)$

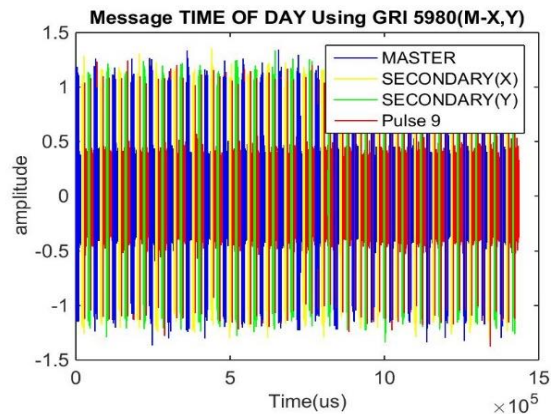
الگوریتم پیشنهادی

عملکرد روش‌های HCPR و تأخیر و اضافه بر مبنای اطلاعات یک نقطه از پالس (نقطه عبور از صفر) است که در شرایط نویزی دارای خطای زیادی می‌باشد. برای این منظور می‌توان از اطلاعات کلی یک شکل پالس (پوش پالس) استفاده کرد و با این کار دقت افزایش می‌یابد. علاوه بر این روش‌های حال حاضر مبتنی بر

اضافه می‌کند و آن‌ها را ارسال نمی‌کند و در نهایت 24 سیمبل ارسال می‌شود. همچنین گیرنده برای کُبدرداری باید 7 سیمبل صفر را به 24 سیمبل دریافتی اضافه کند. با این نوع کُددگاری تا 7 خطا قابل تشخیص و تصحیح است [22-23].

تخمین مکان پالس نهم

برای دریافت صحیح داده‌های ارسالی فرستنده کانال داده لازم است بر اساس رابطه (2) مکان پالس نهم با حداکثر خطای $1\mu\text{sec}$ تخمین زده شود تا خطایی در تشخیص نقطه شروع سیگنال پالس نهم و به دست آوردن سیمبل‌ها ایجاد نگردد. شکل 6 سیگنال‌های دریافتی ایستگاه‌های اولیه و ثانویه پیام زمانی با GRI 7270 در کانال AWGN و شکل 7 بزرگنمایی GRI اول و دوم را نشان می‌دهد. برای محاسبه 120 بیت داده ارسالی باید مکان پالس نهم ایستگاه اصلی در هر GRI را به دست آورد. از روش‌های متعددی برای تخمین نقطه شروع سیگنال لورن (نقطه عبور از صفر سوم در شکل 8) استفاده می‌شود. در ادامه پس از تبیین و بررسی الگوریتم‌هایی که تاکنون ارائه شده، الگوریتم موردنظر جهت بهبود گیرنده کانال داده پیشنهاد می‌شود.



شکل 6. سیگنال‌های دریافت 24GRI (حاوی پیام زمانی)

الف- الگوریتم HCPR¹⁷

در این روش ابتدا یک عبور از صفر در لحظه t میکروثانیه پس از شروع پالس مشخص می‌گردد. سپس دامنه سیگنال در دو پیک متوالی (زمان‌های $t - \tau/\delta \mu\text{sec}$ و $t + \tau/\delta \mu\text{sec}$) اندازه‌گیری می‌شود. نسبت این دو عددی منفی است که عبور از صفر موردنظر را تعیین می‌کند. برای یک پالس استاندارد HCPR زمان t از رابطه (3) به دست می‌آید [21]:

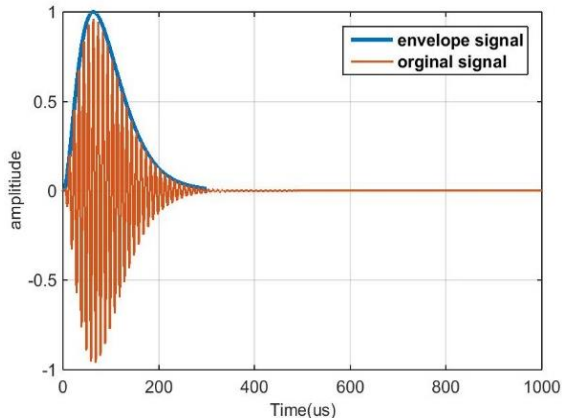
$$h(t) = \frac{E(t + \tau/\delta)}{E(t - \tau/\delta)} = \left(\frac{t + \tau/\delta}{t - \tau/\delta}\right)^2 e^{-\frac{1}{\tau\delta}} \quad (3)$$

می‌توان رابطه اخیر را به صورت t بر حسب h بیان کرد:

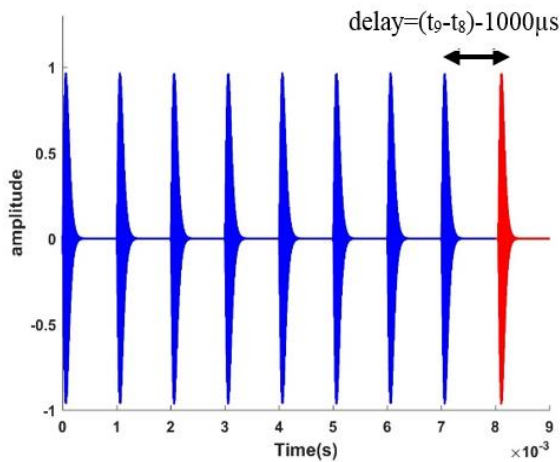
$$t = \frac{\tau/\delta(A+1)}{A-1} ; A = \sqrt{h} e^{\frac{1}{\tau\delta}} \quad (4)$$

¹⁷ HCPR: Half-Cycle Peak Ratio

از ماکزیمم دامنه سیگنال لورن، بالا بودن دامنه آن است که این امر باعث اثرگذاری کمتر نویز کانال بر روی آن می شود. شکل 10 روش کار الگوریتم اول را نشان می دهد.



شکل 9. سیگنال لورن و پوش سیگنال به دست آمده با استفاده از تبدیل هیلبرت



شکل 10. روش کار الگوریتم اول

ب- الگوریتم دوم

پیشنهاد اصلی این پژوهش برای بالا بردن دقت تخمین مکان پالس نهم استفاده از پالس اول تا نهم به جای دو پالس های هشتم و نهم است. در ابتدا ماکزیمم دامنه پالس اول را از بازه زمانی نقطه تقریبی شروع سیگنال تا $70\mu\text{sec}$ بعد محاسبه کرده و سپس همین عملیات برای پالس دوم تا هشتم زنجیره ادامه داده می شود. در نهایت ماکزیمم دامنه پالس نهم از بازه زمانی 8msec بعد از شروع تقریبی سیگنال تا $230\mu\text{sec}$ بعد از آن محاسبه می شود. پس از محاسبه ماکزیمم هر 9 پالس، اختلاف زمانی 8 پالس اول با پالس نهم با در نظر گرفتن تأخیرهای بین پالسی، مطابق با شکل 11 و رابطه (9) به دست می آید. در نهایت یک آرایه با 8 تأخیر مانند ماتریس رابطه (10) به دست می آید که باید یکی از این تأخیرهای به دست آمده را به عنوان مکان اصلی پالس نهم انتخاب کرد.

محاسبه تأخیر بین پالس هشتم و نهم است که دقت آن تنها منوط به یک بار محاسبه تأخیر است و از قابلیت اعتماد کافی برخوردار نیست چرا که بر مبنای آن نمی توان صحت تأخیر به دست آمده را بررسی کرد. برای حل این مشکل و به منظور بهبود تخمین مکان پالس نهم در این پژوهش سه الگوریتم پیشنهاد شده است. برای این کار در ابتدا از تبدیل هیلبرت برای محاسبه پوش سیگنال استفاده می شود، سپس با استفاده از مقایسه پوش سیگنال به دست آمده و نقاط ماکزیمم پالس ها، مکان آن ها تخمین زده می شود. در الگوریتم پیشنهادی اول - مانند سایر روش ها - تنها از دو پالس هشتم و نهم برای تخمین مکان پالس نهم استفاده می شود و در الگوریتم دوم و سوم به جای استفاده از دو پالس (پالس هشتم و نهم) از نُه پالس اول زنجیره برای تخمین دقیق تر مکان پالس نهم استفاده شده است.

محاسبه پوش سیگنال لورن مبتنی بر تبدیل هیلبرت

چنانچه به عنوان یک نوآوری از تبدیل هیلبرت برای محاسبه پوش سیگنال لورن استفاده شود، تبدیل هیلبرت سیگنال ورودی $f(x)$ به صورت رابطه (6) تعریف می شود [25]:

$$g(y) = H[f(x)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(y)}{x-y} dy \quad (6)$$

رابطه اخیر به صورت کانولوشن آمده در رابطه (7) قابل بیان است.

$$g(y) = \frac{1}{\pi x} * f(x) \quad (7)$$

بنابراین می توان از یک الگوریتم سریع مبتنی بر قضیه کانولوشن برای محاسبه تبدیل هیلبرت استفاده کرد. این الگوریتم به صورت رابطه (8) قابل بیان است:

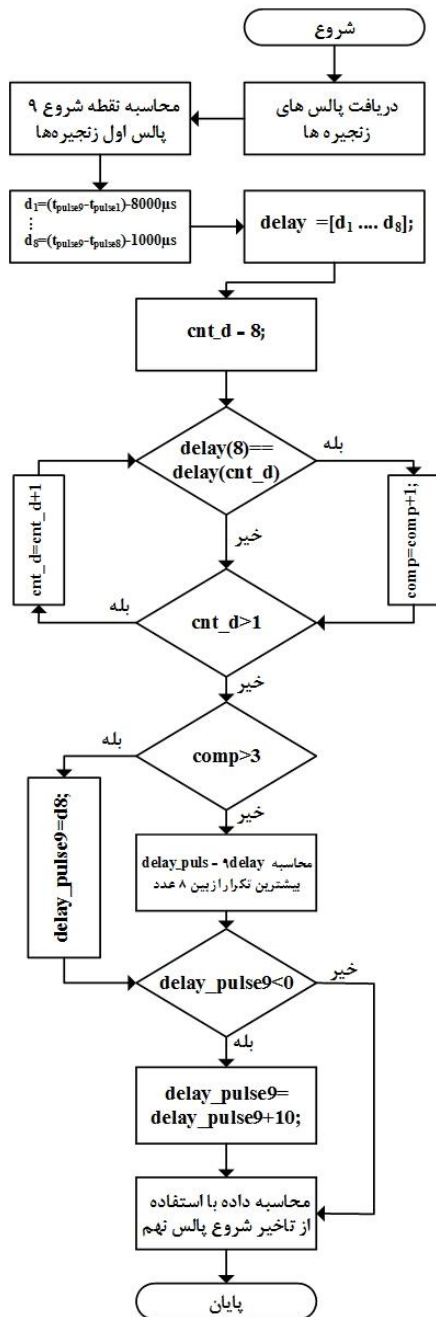
$$g(y) = \text{IFFT} \left\{ \text{FFT} \left(\frac{1}{\pi x} \right) \times \text{FFT} [f(x)] \right\} \quad (8)$$

در رابطه اخیر FFT تبدیل فوریه سریع و IFFT عکس آن است. شکل 9 نتیجه شبیه سازی محاسبه پوش سیگنال لورن را با استفاده از تبدیل هیلبرت نشان می دهد.

الف- الگوریتم اول

در این الگوریتم ابتدا سیگنال لورن با استفاده از پوش سیگنال محاسبه شده از طریق تبدیل هیلبرت تشخیص داده می شود و سپس شروع تقریبی سیگنال به دست می آید. پس از تعیین شروع تقریبی پالس (با توجه به اینکه از روی اختلاف تأخیر بین شروع پالس هشتم و نهم عملیات دمودولاسیون انجام می گیرد) 8msec برای پالس هشتم و 9msec برای پالس نهم از نقطه تقریبی شروع سیگنال جلو رفته و با توجه به اینکه ماکزیمم تأخیر دمودولاسیون PPM، $160\mu\text{sec}$ است و ماکزیمم مقدار دامنه سیگنال لورن در حدود $70\mu\text{sec}$ پس از شروع سیگنال می باشد از مجموع این دو تأخیر برای تشخیص بازه زمانی پیدا کردن ماکزیمم دامنه سیگنال استفاده می شود. مهم ترین ویژگی استفاده

و سپس داده‌ها با استفاده از مدولاسیون مکان پالس مدوله می‌گردند. برای اینکه بتوان عملکرد گیرنده کانال داده را در SNRهای مختلف تحلیل کرد از روش حداقل مربعات خطا^{۱۸} استفاده شده است. به این صورت که یک تأخیر ثابت را 5000 بار ارسال کرده و انتظار می‌رود که گیرنده بتواند تأخیر دریافتی را با خطای کمتر از 1µsec نسبت به تأخیر ارسالی دریافت کند. شکل 13 نمودار مقایسه حداقل مربعات خطای تأخیر دریافتی و شکل 14 مقایسه کارایی احتمال خطای بیت، برحسب SNR در کانال AWGN برای روش HCPR و روش‌های بیان شده را نشان می‌دهد.



شکل 12. روندنمای الگوریتم سوم

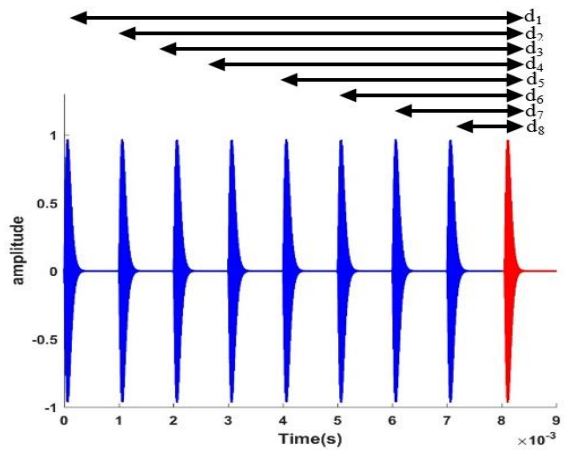
$$d = \sum_{i=1}^n (t_i - t_i) - 1000(9-i) \quad (9)$$

$$d = [d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7, d_8] \quad (10)$$

در رابطه اخیر d تأخیر بر حسب میکروثانیه، و t₉ زمان ماکزیمم دامنه پالس نهم زنجیره و t_i زمان ماکزیمم دامنه پالس اول تا هشتم زنجیره است. در این الگوریتم ابتدا تعداد آرایه‌های تکراری محاسبه می‌شود و در نهایت عددی انتخاب می‌گردد که بیشترین تکرار را داشته باشد. مزیت روش اخیر در این است که تأخیر با بیشترین تکرار اولویت بالاتری پیدا می‌کند که منجر به کاهش خطا خواهد شد.

ج- الگوریتم سوم

مهم‌ترین مشکلی که الگوریتم دوم در انتخاب تأخیر مناسب بین هشت عدد به‌دست‌آمده دارد اولویت قرار ندادن تأخیر بین پالس هشتم و نهم است چرا که پالس هشتم به پالس نهم نزدیک‌تر بوده و باید از اولویت بالاتری برخوردار باشد. برای حل این مشکل الگوریتم سوم پیشنهاد می‌شود. در واقع این الگوریتم ترکیبی از روش قبل و روش مقایسه است. به این صورت که در ابتدا تأخیر هشتم یعنی تأخیر بین پالس هشتم و نهم را در اولویت قرار داده و با هفت تأخیر دیگر مقایسه می‌کند. چنانچه حداقل چهار تأخیر دیگر با تأخیر بین پالس هشتم و نهم اختلافی کمتر از 1µsec داشته باشند، تأخیر هشتم انتخاب می‌شود و در غیر این صورت احتمال خطای تأخیر بین پالس هشتم و نهم بیشتر بوده و از روش بیشترین تکرار استفاده می‌شود. روندنمای کلی این الگوریتم در شکل 12 آمده است.



شکل 11. روش پیشنهادی تخمین مکان پالس نهم با استفاده از 9 پالس

شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی الگوریتم HCPR و سه الگوریتم پیشنهادی بررسی می‌شود. برای شبیه‌سازی کانال داده، ابتدا پالس نهم به زنجیره‌های ارسالی از فرستنده اضافه می‌شوند

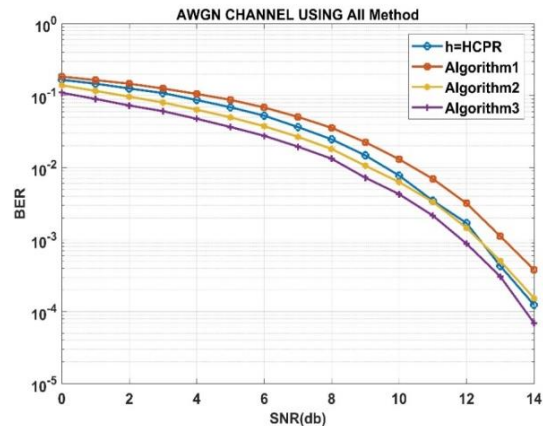
¹⁸ LSE: Least Square Error

الگوریتم پیشنهادی این مقاله در SNRهای بیشتر از 0dB کمتر از 10 درصد است که از روش HCPR کمتر می باشد.

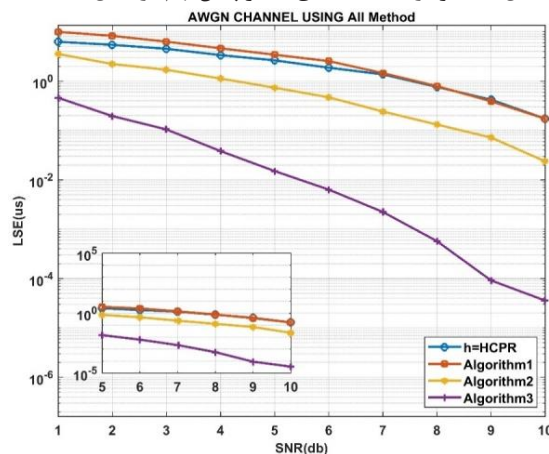
مراجع

- [1] G. Johnson, R. Shalae, R. Hartnett, P. Swaszek, M. Narins, "Can loran meet GPS backup requirements?", IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag., vol. 20, no. 2, pp. 3-12, Feb. 2005.
- [2] F. D. Nunes, F. M. G. Sousa, "GNSS blind interference detection based on fourth-order autocumulants", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 52, no. 5, pp. 2574-2586, Oct. 2016.
- [3] M. Wildemeersch, C. H. Slump, A. Rabbachin, "Acquisition of GNSS signals in urban interference environment", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 50, no. 2, pp. 1078-1091, Apr. 2014.
- [4] E. Axell, F. M. Eklöf, P. Johansson, M. Alexandersson, D. M. Akos, "Jamming detection in GNSS receivers: Performance evaluation of field trials", Navigation, vol. 62, no. 1, pp. 73-82, 2015.
- [5] B. Motella, L. L. Presti, "Methods of goodness of fit for GNSS interference detection", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 50, no. 3, pp. 1690-1700, Jul. 2014.
- [6] M. Abdizadeh, J. T. Curran, G. Lachapelle, "New decision variables for GNSS acquisition in the presence of CW interference", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 50, no. 4, pp. 2794-2806, Oct. 2014.
- [7] W. Johnson, "Development of an Integrated GNSS-eLoran Signal Simulator", 2008.
- [8] A. Khorrami, A. Afifi, M. H. Ghezelayagh, "Design and analysis of loran transmitter based on PWM switching and OMO", AEU - International Journal of Electronics and Communications, vol. 111, pp. 1-8, Nov, 2019.
- [9] A. Khorrami, A. Afifi, M. H. Ghezelayagh, A. R. Amin, "Extraction of optimum PWM levels in Loran switching transmitter for using in ground-based positioning system", Adv. Defence Sci. & Tech., vol. 2, pp. 351-360, 2019 (in Persian).
- [10] M. Bayat, M. H. Madani, "A new algorithm for synchronous continuous wave interference cancellation in Loran navigation system", Adv. Electronic & Cyber Defense Sci. & Technol. vol. 4, No. 2, pp. 23-38, 2016 (in Persian).
- [11] P. Williams, S. Basker, N. Ward, "e-Navigation and the case for eLoran", J. Navigat., vol. 61, no. 3, pp. 473-484, 2008.
- [12] A. Helwig, G. Offermans, C. Stout, C. Schue, "eLoran System Definition and Signal Specification Tutorial", International Loran Association (ILA-40), Nov. 2011.
- [13] W. Xiong, Y. Li, and Q. Liang, "Loran-C synchronous interference suppression using improved adaptive algorithms," in International Conf. on Wireless Communications Networking and Mobile Computing, pp. 47-49, 2010.
- [14] Z. Yinbing, J. Xu, T. Qiu, G. Cui, "Synchronous carrier wave interference suppression based on accumulation and average in Loran-C," in IEEE International Conf. on Electronic Measurement & Instruments, pp. 2.50-2-54, 2009.

بر اساس نتایج به دست آمده، احتمال خطای الگوریتم پیشنهادی اول نسبت به روش HCPR بیشتر بوده و نرخ احتمال خطای بیت هر دو روش در 0dB بیش از 10 درصد است اما با استفاده از الگوریتم دوم و سوم نرخ احتمال خطای بیت به مراتب کمتر شده و به 10 درصد نزدیک تر خواهد شد. همچنین با استفاده از کُدبرداری RS می توان تا 7 سیمبل (35 بیت داده) را اصلاح کرد.



شکل 13. نمودار مقایسه خطای تأخیر پالس در کانال AWGN



شکل 14. نمودار مقایسه احتمال خطای بیت در کانال AWGN

نتیجه گیری

این مقاله کانال داده لورن مورد بررسی قرار گرفت و روش های تشخیص نقطه شروع سیگنال به منظور تخمین مکان پالس نهم برای به دست آوردن سیمبل های ارسالی کانال داده بیان گردید. با این هدف، برای اولین بار سه الگوریتم جهت بهبود تخمین مکان پالس نهم در کانال AWGN پیشنهاد شد. در الگوریتم اول از خاصیت پوش سیگنال و ماکزیمم دامنه سیگنال استفاده گردید. کارایی این الگوریتم مشابه روش HCPR است و در الگوریتم پیشنهادی دوم و سوم برای بهبود آن به جای استفاده از دو پالس، از سه پالس اول زنجیره، مبتنی بر روش مقایسه و تکرار جهت تخمین دقیق تر مکان پالس نهم استفاده شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که نرخ احتمال خطای بیت در سومین

- [15] X. L. Xi , L. L. Zhou, J. S. Zhang, and J. F. Liu, "Combined IE-FDTD algorithm for long-range Loran-C ground-wave propagation," IEEE Antennas Propag., vol. 60, no. 8, pp. 3802– 3808, Aug. 2012.
- [16] P. Liatos and A.M. Hussein, "Characterization of noise in the lightning current derivative signals measured at the CN tower," IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility (EMC), vol. 47, no. 4, pp. 986-997, Nov. 2005.
- [17] J. Šafář, "Analysis, modeling and mitigation of cross rate interference in enhanced loran", Ph.D. thesis, August 2014.
- [18] K. Carroll, B. B. Peterson, "Differential Loran-C", Proceedings of GNSS 2004, the European Navigation Conference, May 2004.
- [19] B. Peterson, K. Dykstra, D. Lown, K. Shmihluk, "Loran data channel communications using 9th pulse modulation (ver.1.3)", USCG Loran Support Unit, Wildwood, NJ, 20 Oct. 2006.
- [20] K. Dykstra and B. B. Peterson, "The Loran Data Channel: Progress to Date and Future Plans", presented at the 35th Annual Technical Symposium, International Loran Association, Groton, CT, 24-25, Oct. 2006.
- [21] S. Lo, B. Peterson, P. Enge, P. Swaszek, "Loran data modulation: extensions and examples", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 43, no. 2, pp. 628-644, Apr. 2007.
- [22] L. Hartshorn, F. Swaszek, "Performance of Loran-C 9th Pulse Modulation Techniques", National Technical Meeting, At Monterey, CA, 2006.
- [23] G. A. Daraisch, C. W. Baum, "Decoder error and failure probabilities for Reed-Solomon codes: Decodable vectors method", IEEE Trans. Commun., vol. 46, pp. 857-869, July 1998.
- [24] D. C. Bruckner, "Automatic pulse shaping with the Loran-C transmitters", M.Sc. thesis in Electrical Engineering, Naval Postgraduate School, 1992.
- [25] F. Kschischang, "The Hilbert Transform", University of Toronto, 2006.

