

## تحلیل خطای میانگین دیجیتال خطی پالس‌های دریافتی در گیرنده متحرک سریع در سیستم ناوبری رادیویی برد بلند

سید علی اصغر شهیدیان<sup>۱</sup>، سید محمد مهدی دهقان<sup>۲</sup>، احیاء باوری<sup>۳</sup>، محمدعلی علیرضاپوری<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>همکار پژوهشی مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

<sup>۲</sup>استادیار مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، SMMD@mut.ac.ir

<sup>۳</sup>محقق مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

<sup>۴</sup>استادیار پژوهشکده علوم و فناوری‌های شمال، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

### چکیده

یکی از عوامل موثر بر خطای تعیین موقعیت در گیرنده‌های لورن-سی، دقت اندازه‌گیری زمان دریافت سیگنال‌های مورد نیاز برای محاسبه اختلاف زمانی است. عموماً گذر از صفر سوم سیگنال پالس لورن-سی به عنوان مبنای تعیین دقیق زمان دریافت استفاده می‌شود که دقت آن وابستگی زیادی به نرخ سیگنال به نویز دارد. الگوریتم میانگین دیجیتال خطی با میانگین‌گیری از پالس‌های چندین بازه کد پالس متوالی دریافت شده توسط گیرنده لورن-سی به افزایش نرخ سیگنال به نویز کمک می‌نماید. میانگین دیجیتال خطی در یک گیرنده با سرعت بالا، علی‌رغم کاهش توان نویز، به دلیل تاخیر پالس‌های شرکت‌کننده در میانگین‌گیری نسبت به یکدیگر، موجب اعوجاج پالس میانگین می‌گردد. به عبارت دیگر، در گیرنده‌های سریع علاوه بر نرخ سیگنال به نویز و تفاضل پوش به سیکل پالس میانگین، اعوجاج آن نیز یک عامل مهم در دقت تشخیص گذر از صفر سوم است. این مقاله به دنبال تحلیل اثر بردار حرکت گیرنده بر کارایی میانگین دیجیتال خطی و تعیین آستانه سرعت گیرنده برای اندازه‌گیری گذر از صفر سوم پالس میانگین با دقت مورد نظر است. به کمک تفکیک سیگنال حاصل از میانگین‌گیری به دو بخش مطلوب و نامطلوب، امکان تعریف اعوجاج پالس میانگین با مشخصه‌های شناخته شده مانند تفاضل پوش به سیکل و ضریب تضعیف دامنه فراهم شده و میزان اعوجاج به صورت تابعی از بردار سرعت گیرنده بدست آمده است. همچنین با شبیه‌سازی چارچوب تحلیلی پیشنهادی، دیدگاه مناسبی در خصوص میزان تاثیر بردار سرعت گیرنده روی دقت اندازه‌گیری زمان دریافت پالس به وجود آمده است.

### کلیدواژه

سیستم لورن-سی، موقعیت‌یابی و سایل نقلیه، بازه کد پالس، تأخیر کدینگ، تأخیر انتشار، میانگین دیجیتال خطی، گیرنده سرعت بالا

### مقدمه

پژوهش‌های مرتبط با سیستم ناوبری لورن-سی گسترده‌ی بسیار وسیعی دارد. بخشی از مطالعات به ارائه الگوریتم موقعیت‌یابی گیرنده روی سطح کره زمین با استفاده از اندازه‌گیری‌های اختلاف زمانی پرداخته‌اند [۹-۱۱]. بخشی دیگر به کنترل فرستنده‌ها و کاهش خطای سیستم اختصاص یافته‌اند [۱۲]. مطالعات بسیاری نیز در زمینه شناخت و کاهش خطای سیستم لورن-سی انجام شده است [۱۳-۱۵]. برخی از این مطالعات به شناخت و مدل‌سازی خطاها اختصاص داشته [۱۶ و ۱۷] و برخی دیگر با انجام آزمایش‌های عملی سعی در تعیین میزان خطای سیستم داشته‌اند [۱۸]. در سال‌های اخیر نیز موضوع ناوبری منعطف<sup>۱</sup> سعی بکارگیری منابع مختلف قابل استفاده برای ناوبری از قبیل سیستم‌های ناوبری جهانی فضاپایه، شبکه eLoran، شبکه‌های مخابراتی و... به صورت یکپارچه و مکمل برای افزایش کارایی سیستم‌های ناوبری می‌باشد [۱۹ و ۲۰].

لورن-سی یک سیستم ناوبری برد بلند است که در بسیاری از کشورها حتی کشورهای همسایه از جمله عربستان پیاده‌سازی شده و استفاده می‌شود [۱]. ایران برای تامین سیستم ناوبری مستقل خود برنامه‌ای برای راه‌اندازی سیستم ناوبری برد بلند لورن-سی در دست اجرا دارد [۲] و حجم پژوهش‌های زیادی در سال‌های اخیر در تلاش هستند تا نیازهای نظری-کاربردی این سیستم را برطرف نمایند [۳-۶]. این سیستم ملی می‌تواند بسیاری از نیازهای ناوبری کشور نظیر ناوبری کشتی، هواپیما و موشک را برطرف نموده و وابستگی به سامانه‌های ناوبری غیرملی را از بین ببرد. از ویژگی‌های سیستم لورن-سی، پیچیدگی اخلاص و جمینگ در آن و پوشش گسترده آن است [۷ و ۸].

تعیین شده است. میزان اعوجاج و SNR پالس میانگین تابعی از تاخیر و تعداد پالس‌های شرکت کننده در میانگین دیجیتال خطی بوده و تاخیر و تعداد پالس‌ها نیز تابعی از سرعت گیرنده است. بنابراین برای بردار سرعت مشخص ویژگی‌های اعوجاج پالس میانگین قابل محاسبه خواهد بود. طبق تحلیل‌های انجام شده در این مقاله، پالس میانگین حاصل جمع یک پالس استاندارد با تفاضل پوش به سیکل<sup>۵</sup> (ECD) و ضریب تضعیف دامنه غیرصفر (بخش مطلوب) و یک پالس با پوش و فاز غیرمشابه با پالس استاندارد (بخش نامطلوب پالس میانگین) است. برای تاخیرهای نسبتاً کوچک، نسبت بیشینه دامنه پالس مطلوب به بیشینه دامنه پالس نامطلوب (ثابت تناسب) قابل ملاحظه است. طبق تحلیل‌های انجام شده، با تعیین حداکثر ECD، حداقل SNR و حداقل ثابت تناسب، حد بیشینه سرعت گیرنده مطابق الگوریتم تشخیص گذر از صفر سوم قابل محاسبه است.

در ادامه پس از بررسی اصول عملکرد سامانه لورن-سی و میانگین دیجیتال خطی، الگوریتم تعیین گذر از صفر سوم پالس ارائه شده است. پس از آن، رابطه بردار سرعت با تاخیر پالس‌ها بیان شده و با معرفی بخش مطلوب و نامطلوب پالس میانگین، ویژگی‌های پالس میانگین تعریف و تحلیل شده است. سپس نحوه تعیین آستانه اندازه سرعت گیرنده مطابق ویژگی‌های پالس میانگین و الگوریتم تعیین گذر از صفر سوم، مقادیر ویژگی‌ها برای سرعت‌های مختلف ارائه شده است. در نهایت نیز پس از نتیجه‌گیری مقاله، فعالیت‌های آتی عنوان شده است.

## اصول اندازه‌گیری زمان دریافت سیگنال در سامانه ناوبری رادیویی برد بلند

سیستم موقعیت‌یابی زمین‌پایه لورن-سی باند فرکانسی ۹۰ تا ۱۱۰ کیلوهرتز را اشغال می‌کند و از گروه‌ها یا زنجیره‌هایی شامل حداقل سه فرستنده تشکیل می‌شود [۸]. در یک زنجیره معمولی، یک فرستنده اصلی و دو الی پنج فرستنده ثانویه وجود دارد. ایستگاه اصلی یک رشته از نه پالس ارسال می‌کند؛ درحالی‌که ایستگاه‌های ثانویه هر کدام بعد از دریافت سیگنال ایستگاه اصلی و یک تأخیر کدینگ<sup>۶</sup> (CD) مشخص، یک رشته از هشت پالس ارسال می‌کنند. برای گیرنده لورن-سی تفاضل زمان دریافت پالس‌های هر ایستگاه ثانویه از پالس‌های ایستگاه اصلی و تأخیر انتشار<sup>۷</sup> (ED) به‌عنوان اختلاف‌زمانی<sup>۸</sup> (TD)

سیستم ناوبری لورن-سی عموماً برای تعیین موقعیت اجسام ثابت و یا اجسام متحرک دارای سرعت حرکت پایین استفاده می‌شود. در مکان‌یابی این اجسام عواملی از قبیل تداخل، نویز حرارتی و انحراف ساعت فرستنده‌ها باعث کاهش دقت موقعیت‌یابی می‌گردند. برای کاهش تاثیر عوامل خطای سیستم لورن-سی تحقیقات گسترده‌ای انجام شده است. برخی از عوامل خطا موجب تاخیر یا تعجیل در دریافت پالس می‌شوند که عمدتاً توسط عوامل ثانویه اضافی<sup>۹</sup> (ASF) جبران می‌شوند [۲۱]. مقادیر ASF به صورت از پیش تعیین شده در دسترس گیرنده‌ها قرار می‌گیرد که دقت تعیین موقعیت را برای گیرنده‌های ساکن به شدت بهبود می‌دهد. برای دستیابی به دقت مورد نظر در مکان‌یابی گیرنده‌های متحرک، روش‌هایی برای جبران‌سازی مقدار ASF براساس جهت حرکت گیرنده پیشنهاد شده است [۲۲]. برخی دیگر از عوامل خطا موجب جمع شدن نویز گوسی با پالس شده و نرخ سیگنال به نویز پالس را کاهش می‌دهند. یک روش مقاوم برای کاهش اثرات نویز گوسی، میانگین دیجیتال خطی است [۲۳]. میانگین دیجیتال خطی عموماً در گیرنده‌های لورن-سی به عنوان پیش‌پردازش برای افزایش نرخ سیگنال به نویز پالس‌ها استفاده شده است. در این روش با میانگین‌گیری از پالس‌های چندین بازه کد پالس<sup>۳</sup> (PCI) متوالی اثرات نویز کاهش می‌یابد.

یکی از کاربردهای بالقوه سامانه لورن-سی، تعیین موقعیت اجسام دارای سرعت حرکت بسیار بالا است. در این مقاله نشان داده خواهد شد که یکی از تغییراتی که بواسطه حرکت‌های دارای دینامیک و سرعت بالا بوجود می‌آید، تغییر دوره تناوب دریافت پالس‌های مشابه از هر فرستنده نسبت به اندازه استاندارد PCI است. تغییر دوره تناوب دریافت پالس‌های مشابه موجب تاخیر پالس‌ها نسبت به یکدیگر در میانگین دیجیتال خطی می‌شود. این امر موجب می‌شود پالس میانگین دچار اعوجاج شده و در بعضی شرایط هدف اصلی میانگین‌گیری یعنی افزایش نرخ سیگنال به نویز<sup>۴</sup> (SNR) و آماده‌سازی پالس برای تشخیص گذر از صفر سوم را دچار خدشه نماید. نویسندگان این مقاله هیچ مرجعی در رابطه با ملاحظات میانگین دیجیتال خطی در گیرنده‌های متحرک با سرعت بالا نیافته‌اند و همچنین در هیچ مرجعی بررسی رابطه اعوجاج پالس میانگین با سرعت گیرنده را مشاهده ننموده‌اند.

هدف این مقاله تحلیل ویژگی‌های اعوجاج ایجاد شده در پالس میانگین در گیرنده متحرک با سرعت بالا و تعیین حد بیشینه سرعت گیرنده برای تشخیص گذر از صفر سوم با حداقل دقت

<sup>۵</sup> Envelope to cycle difference

<sup>۶</sup> Coding delay

<sup>۷</sup> Emission delay

<sup>۸</sup> Time delay

<sup>۹</sup> Additional Secondary Factors

<sup>۳</sup> Pulse coding interval

<sup>۴</sup> Signal-to-noise ratio

صفر مدل می‌شود [۱۶، ۱۷]. گیرنده سیستم لورن-سی معمولاً از فرستنده‌ها فاصله زیادی دارد؛ به همین دلیل، نرخ سیگنال به نویز پالس‌های دریافتی بسیار پایین است و تشخیص گذر از صفر سوم پالس با هر روشی با خطا همراه می‌شود [۲۸]. اغلب اوقات، پالس دریافت شده توسط گیرنده به‌اندازه‌ای غرق در نویز می‌شود که حتی تشخیص وجود پالس نیز دشوار است.

روش معمول برای افزایش نرخ سیگنال به نویز پالس‌های دریافتی، اعمال میانگین دیجیتال خطی روی نمونه‌های پالس‌های مشابه است. منظور از پالس‌های مشابه، پالس‌های هم‌فاز ارسالی از یک فرستنده هستند که دوره تناوب زمانی ارسال آن‌ها به اندازه PCI است. گیرنده در میانگین دیجیتال خطی، سیگنال فرستنده‌ها را پس از نمونه‌برداری به بازه‌های زمانی به طول PCI تقسیم کرده و سپس میانگین نمونه‌های متناظر تمام بازه‌ها را محاسبه می‌کند [۲۹]. با فرض گوسی و ایستادن به مفهوم وسیع<sup>۹</sup> (WSS) بودن نویز سیگنال نمونه‌برداری شده، میانگین‌گیری از نمونه‌های چندین پالس مشابه، توان نویز هر نمونه را کاهش داده و نرخ سیگنال به نویز و در نتیجه دقت تعیین گذر از صفر سوم پالس افزایش می‌یابد [۲۳].

در صورتی که گیرنده ساکن باشد و اعوجاج زمانی در فرستنده و گیرنده وجود نداشته باشد پالس‌های مشابه در PCI‌های متوالی دقیقاً با فاصله زمانی PCI دریافت می‌شوند. بنابراین برای روی هم افتادن پالس‌های مشابه کافی است بازه‌های زمانی به طول PCI به میزان ضربی از PCI جابجا شوند. در این صورت اگر PCI ضریب درستی از دوره تناوب نمونه‌برداری پالس‌ها باشد نمونه‌های مشابه در تمام بازه‌ها روی هم می‌افتند. دو نمونه مشابه نامیده می‌شوند اگر دارای فاصله زمانی مشابه از ابتدای دو پالس مشابه باشند. نرخ سیگنال به نویز نمونه آم از پالس‌های دریافتی و پالس میانگین توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳۰]:

$$\hat{s}_i' = s_i + n_i', \quad SNR_i' = \frac{P_{s_i}}{P_{n_i}} \quad (1)$$

$$\hat{s}_i^{mean} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \hat{s}_i' = s_i + \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N n_i', \quad SNR_i^{mean} = \frac{NP_{s_i}}{P_{n_i}}$$

که در آن  $\hat{s}_i'$  نمونه  $i$ -ام از پالس دریافتی  $t$ -ام است که دارای دو بخش نمونه پالس استاندارد  $s_i$  و نویز  $n_i'$  است.  $P_{s_i}$  توان نمونه  $i$ -ام از پالس استاندارد و  $P_{n_i}$  توان نویز جمع شده با نمونه  $i$ -ام از پالس‌های دریافتی است. پس از میانگین‌گیری از نمونه  $i$ -ام از  $N$  پالس دریافتی، توان نویز  $1/N$  و نرخ سیگنال به نویز  $N$  برابر می‌شود.

تعریف می‌شود. برای مکان‌یابی به حداقل دو TD نیاز است و دقت اندازه‌گیری این مشاهدات از عوامل اصلی موثر در دقت مکان‌یابی در سامانه ناوبری رادیویی برد بلند می‌باشد. عموماً گذر از صفر سوم سیگنال پالس لورن-سی به عنوان مبنای تعیین دقیق زمان دریافت استفاده می‌شود که دقت آن وابستگی زیادی به نرخ سیگنال به نویز دارد. الگوریتم میانگین دیجیتال خطی با میانگین‌گیری از پالس‌های چندین بازه کد پالس متوالی دریافت شده توسط گیرنده لورن-سی به افزایش نرخ سیگنال به نویز کمک می‌نماید. در ادامه این بخش اصول اندازه‌گیری زمان دریافت سیگنال شامل نحوه محاسبه زمان دریافت سیگنال، چگونگی ارتقاء نسبت سیگنال به نویز توسط پیش‌پردازش میانگین دیجیتال خطی، چگونگی تعیین گذر از صفر سوم و تاثیر تاخیر پالس‌های دریافتی بر روی پالس میانگین تشریح خواهد شد. برای مطالعه جزئیات بیشتر در خصوص نحوه عملکرد و مشخصات این سامانه مرجع [۸] ملاحظه شود.

### محاسبه زمان دریافت پالس

وظیفه اصلی گیرنده لورن-سی تعیین دقیق زمان دریافت پالس فرستنده‌ها است. برای اجتناب از تاثیر تداخل موج آسمانی با موج زمینی، گذر از صفر سوم پالس که ۳۰ میکروثانیه پس از ابتدای پالس رخ می‌دهد به عنوان گذر از صفر استاندارد و زمان دریافت پالس تعریف می‌شود [۲۴]. روش‌های متعددی برای تشخیص گذر از صفر سوم وجود دارد که شامل روش تطبیق همبستگی [۲۵]، روش نرخ قله نیم‌سیکل [۲۶] و روش نرخ قله مثبت [۲۳] می‌شود. دقت روش‌های مذکور به SNR و ECD پالس دریافتی [۲۷] و شباهت آن به پالس استاندارد (میزان اعوجاج) وابسته هستند. در گیرنده‌ها راه‌حلی برای کاهش تاثیر ECD و اعوجاج روی دقت تشخیص زمان دریافت وجود ندارد ولی برای افزایش SNR از روش میانگین دیجیتال خطی استفاده می‌شود.

### میانگین دیجیتال خطی

خطاهای مختلفی برای سیستم لورن-سی وجود دارد که اندازه‌گیری صحیح زمان دریافت را دچار اشکال می‌کنند. برخی از خطاها مانند خطای ساعت و پارامترهای کنترلی فرستنده‌ها، در دریافت پالس تاخیر یا تعجیل ایجاد می‌کنند. بعضی دیگر از خطاها مانند نویز حرارتی، تداخل سیگنال‌های طیف‌های مجاور، موتورها و ژنراتورها روی دقت اندازه‌گیری پوش سیگنال تاثیر می‌گذارند که الگوریتم تشخیص گذر از صفر سوم را دچار خطا می‌کنند. به طور کلی این دسته از عوامل خطا، نویزی را با پالس لورن جمع می‌کنند که با یک توزیع گوسی با میانگین

<sup>۹</sup> Wide sense stationary

### تعیین گذر از صفر سوم

حال اگر فرض کنیم  $1/2(s_i + s'_i)$  اعوجاج حاصل از تاخیر پالس  $\hat{s}'_i$  باشد و توان آن با  $P_D$  نمایش داده شود SNR پالس میانگین به صورت رابطه زیر خواهد بود:

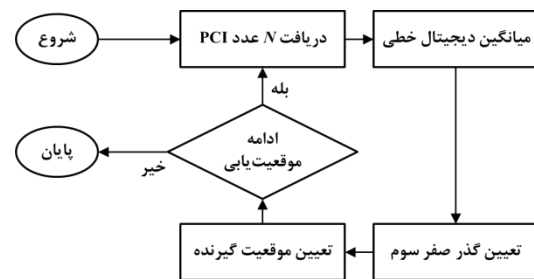
$$SNR_i^{mean} = \frac{P_{s_i}}{P_{n_i} + P_D} \quad (3)$$

بنابراین اگر جابجایی نمونه‌های مشابه از یک میزانی بیشتر باشد ممکن است کاهش توان پالس میانگین بیشتر از کاهش توان نویز باشد و نرخ سیگنال به نویز نسبت به پالس‌های دریافتی افزایش نیابد. بیشینه SNR پالس میانگین زمانی حاصل می‌شود که دوره تناوب پالس‌های هم‌فاز دریافت شده از هر فرستنده به اندازه PCI بوده و همچنین ضریب درستی از دوره تناوب نمونه‌برداری باشد؛ در اینصورت نمونه‌های مشابه دقیقاً روی هم می‌افتند. درحالتی که پالس‌ها نسبت به یکدیگر تاخیر داشته باشند و یا PCI ضریب درستی از دوره تناوب نمونه‌برداری نباشد، پالس میانگین دچار اعوجاج شده و توان سیگنال کاهش می‌یابد [۲۳]. سرعت گیرنده یکی دیگر از عواملی است که موجب تاخیر پالس‌های دریافتی نسبت به PCI می‌شود که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### اصول اندازه‌گیری زمان دریافت سیگنال در سامانه ناوبری رادیویی برد بلند

در صورتی که گیرنده ساکن باشد پالس‌های مشابه هم‌فاز ایستگاه اصلی با دوره تناوب PCI دریافت می‌شوند. با فرض ساکن بودن گیرنده و ثابت بودن زمان پایه  $1^1$  (BT) هر ایستگاه ثانویه، دوره تناوب ارسال و دریافت پالس‌های هم‌فاز مشابه ایستگاه‌های ثانویه نیز برابر PCI است. تحرک گیرنده موجب افزایش یا کاهش دوره‌ی تناوب پالس‌های هم‌فاز دریافت شده از یک فرستنده مشخص می‌شود؛ زیرا جابجایی گیرنده، فاصله بین فرستنده و گیرنده را تغییر داده و در نتیجه زمان دریافت رشته پالس‌های هم‌فاز PCI بعدی دچار تاخیری متناسب با میزان جابجایی گیرنده می‌شود. بنابراین در گیرنده متحرک دوره تناوب دریافت پالس‌های مشابه بزرگ‌تر یا کوچک‌تر از PCI خواهد بود. شکل ۲ میزان تاخیر زمانی رشته پالس‌های دریافت شده از ایستگاه اصلی توسط گیرنده متحرک در حال دور شدن از ایستگاه اصلی نسبت به گیرنده ساکن را نشان می‌دهد. برای سادگی، هر پالس لورن-سی با یک تابع ضربه نمایش داده شده است. در این شکل دور شدن گیرنده از فرستنده باعث شده است که مجموعه پالس‌های بازه تکرار

پس از میانگین‌گیری و افزایش نرخ سیگنال به نویز می‌توان گذر از صفر سوم را بدست آورد. دقت تعیین گذر از صفر سوم برای الگوریتم‌های مختلف، متفاوت است. مثلاً الگوریتم پیشنهادی در [۲۳] گذر از صفر سوم را با دقتی بالاتر از ۱۵۰ نانوثانیه برای نرخ سیگنال به نویز بالاتر از ۱۵ دسیبل تعیین می‌کند. حداقل تعداد PCI‌هایی که باید میانگین‌گیری شوند به SNR پالس‌ها قبل از میانگین‌گیری و SNR لازم برای تعیین زمان گذر از صفر سوم با دقت مشخص وابسته است. معمولاً در گیرنده‌های لورن-سی زمان لازم برای تعیین موقعیت توسط کاربر تعیین می‌شود که دقت موقعیت‌یابی با افزایش تعداد PCI‌های دریافتی بهبود می‌یابد. به همین دلیل گیرنده‌ها بنا به دقت موردنیاز زمان لازم برای پاسخ‌دهی را متغیر در نظر می‌گیرند. به‌عنوان مثال گیرنده RAYNAV 780 بنا به درخواست کاربر زمان لازم برای تعیین موقعیت را بین ۳۰ الی ۳۰۰ ثانیه متغیر در نظر گرفته است [۳۱]. به صورت کلی روند تعیین زمان دریافت پالس و موقعیت‌یابی گیرنده با الهام از مرجع [۲۳] در شکل ۱ خلاصه شده است.



شکل ۱. روند موقعیت‌یابی سامانه لورن-سی

### تأثیر تاخیر پالس‌های دریافتی روی پالس میانگین

خطاهایی از قبیل تغییر فرکانس کریستال گیرنده، اعوجاج زمانی ساعت فرستنده‌ها و تغییر زمانی هدایت زمین باعث می‌شوند دوره تناوب پالس‌های مشابه دقیقاً برابر PCI نباشد و پالس‌ها با تاخیر یا تعجیل دریافت شوند. در اینصورت حتی با نمونه‌برداری با دوره تناوبی متناسب با PCI نمی‌توان از نمونه‌های مشابه پالس‌ها میانگین‌گیری نمود. طبق رابطه (۲) و (۳) اگر به دلیل تاخیر پالس‌ها، نمونه  $i$ -ام از پالس  $t$ -ام با نمونه  $i'$ -ام از پالس  $t'$ -ام میانگین‌گیری شود، علی‌رغم کاهش توان نویز با ضریب  $1/N$ ، توان پالس میانگین نیز کاهش می‌یابد.

$$\begin{aligned} \hat{s}_i^{mean} &= \frac{1}{2}(\hat{s}'_i + \hat{s}_i) = \frac{1}{2}(s_i + s'_i) + \frac{1}{2}(n'_i + n_i) \\ &= \frac{1}{2}(s_i + s_i - (s_i - s'_i)) + \frac{1}{2}(n'_i + n_i) \\ &= s_i - \frac{1}{2}(s_i - s'_i) + \frac{1}{2}(n'_i + n_i) \end{aligned} \quad (2)$$

با توجه به رابطه (۶) میزان تاخیر پالس تابعی از بازه کدینگ پالس (PCI)، سرعت حرکت گیرنده (v)، سرعت انتشار امواج (c)، فاصله گیرنده از فرستنده در لحظه دریافت پالس مشابه در PCI قبلی  $d_i$ ، زاویه قرارگیری اولیه گیرنده نسبت به فرستنده ( $\alpha_i$ ) و جهت حرکت گیرنده ( $\beta_i$ ) است. به طور خلاصه، تاخیر پالس ها به دینامیک حرکتی گیرنده و پارامترهای زنجیره وابسته است. پارامترهای زنجیره شامل PCI و c و متغیرهای دینامیک حرکتی گیرنده شامل  $d_i$ ،  $v_i$  و ( $\beta_i - \alpha_i$ ) می شود.  $\alpha_i$  و  $d_i$  به موقعیت فرستنده  $\mathbf{x}_i^{rc} = [x_i^{rc} \ y_i^{rc}]^T$  و موقعیت گیرنده  $\mathbf{x}_i^{rc} = [x_i^{rc} \ y_i^{rc}]^T$  در لحظه  $i$ -ام وابسته هستند. موقعیت فرستنده پارامتری از زنجیره بوده و برای گیرنده مشخص است. همچنین با فرض  $\gamma_i = (\beta_i - \alpha_i)$  می توان  $\gamma_i$  را به عنوان متغیر وابسته به جهت حرکت گیرنده و موقعیت اولیه گیرنده در نظر گرفت. در نتیجه با مشخص بودن پارامترهای زنجیره میزان تاخیر پالس ها به متغیرهای  $\gamma_i$ ،  $v_i$  و وابسته هستند.

با ادامه مسیر تا N عدد PCI متوالی دنباله ای از  $\tau_{d_i}$  ها بدست می آید. فرض شده است که  $\tau_{d_0}$  تاخیر دریافت اولین PCI باشد که مقدار آن صفر فرض شده است. بنابراین دنباله تاخیر دریافت PCI های متوالی  $\tau_d = [\tau_{d_0}, \tau_{d_1}, \dots, \tau_{d_{N-1}}]$  به طوریکه  $\tau_{d_0} = 0$  است. طبق رابطه (۶) توزیع  $\tau_d$  با پارامترهای زنجیره،  $\mathbf{X}^{rc} = [x_0^{rc}, x_1^{rc}, \dots, x_{N-1}^{rc}]$  و  $\boldsymbol{\gamma} = [\gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_{N-1}]$  متناسب است.  $\mathbf{v} = [v_0, v_1, \dots, v_{N-1}]$

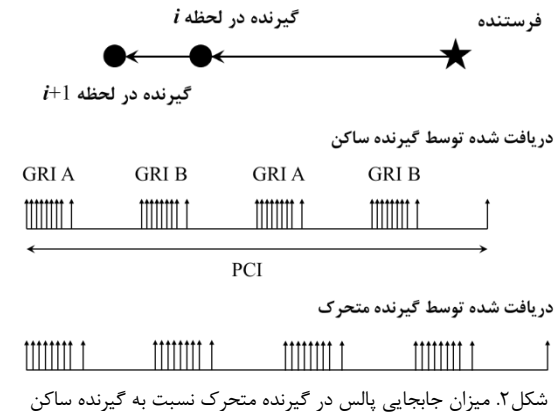
### تحلیل عملکرد میانگین دیجیتالی خطی در گیرنده با سرعت بالا

شکل موج پالس لورن-سی یک تابع نمایی نامتقارن است که به صورت رابطه زیر نمایش داده می شود [۳، ۱۶ و ۲۳]:

$$s(t, \tau, \varphi) = \begin{cases} A(t-\tau)^2 e^{-\frac{2(t-\tau)}{65}} \sin(2\pi f_c t + \varphi) & t \geq \tau \\ 0 & t < \tau \end{cases} \quad (7)$$

که در آن A ثابت هنجارساز مرتبط با بزرگی بیشینه جریان آنتن برحسب آمپر، t زمان به میکروثانیه،  $\tau$  تفاضل پوش به سیکل (ECD) به میکروثانیه، f فرکانس حامل برابر ۱۰۰ کیلوهرتز و  $\varphi$  پارامتر فاز کد که صفر یا  $\pi$  رادیان است. اگر گیرنده، N عدد PCI دریافت کند به گونه ای که (i+1)-امین پالس نسبت به i-امین پالس به میزان  $\tau_{d_i}$  ثانیه تاخیر داشته باشد دنباله تاخیرها به صورت  $\tau_d = [\tau_{d_0}, \tau_{d_1}, \dots, \tau_{d_{N-1}}]$  به طوریکه  $\tau_{d_0} = 0$  خواهد بود. با در نظر گرفتن زمان دریافت پالس PCI اولیه به عنوان زمان مرجع، تاخیر پالس PCI های بعدی

گروه  $i+1$  (GRI) بعدی نسبت به گیرنده ساکن با تاخیر دریافت شوند.

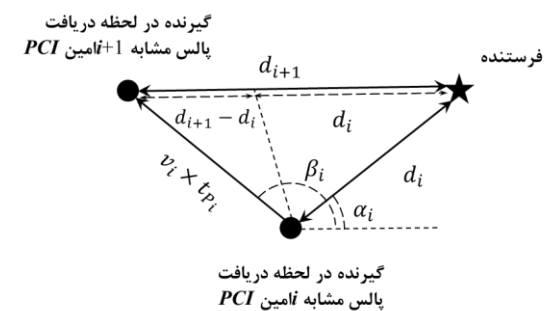


با توجه به شکل ۳ با فرض مسطح بودن زمین، اگر گیرنده با زاویه  $\alpha_i$  نسبت به فرستنده قرار گرفته باشد و با سرعت v در جهت  $\beta_i$  حرکت کند، پالس هم فاز مشابه (i+1)-امین PCI پس از  $t_{p_i}$  ثانیه بعد از دریافت پالس هم فاز مشابه i-امین PCI توسط گیرنده دریافت می شود:

$$t_{p_i} = PCI + \tau_{d_i} = PCI + \frac{d_{i+1} - d_i}{c} \quad (4)$$

که در آن  $\tau_{d_i}$  تاخیر پالس در گیرنده متحرک نسبت به گیرنده ساکن و c سرعت امواج در محیط است. طبق شکل ۳ رابطه فاصله گیرنده از فرستنده در لحظه دریافت پالس هم فاز مشابه (i+1)-امین PCI ( $d_{i+1}$ ) با  $t_{p_i}$  نیز به سادگی از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$d_{i+1}^2 = d_i^2 + v_i^2 t_{p_i}^2 - 2d_i v_i t_{p_i} \cos(\beta_i - \alpha_i) \quad (5)$$



شکل ۳. محاسبه میزان تاخیر پالس در مدل مسطح

با توجه به روابط (۴) و (۵) و با فرض  $\gamma_i = (\beta_i - \alpha_i)$  خواهیم داشت:

$$d_{i+1} = \frac{v_i^2 (cPCI - d_i) - cd_i v_i \cos \gamma_i}{c^2 - v_i^2} + \frac{c \sqrt{d_i v_i \cos \gamma_i (d_i v_i \cos \gamma_i + 2cd_i - 2PCIc^2) + PCIc v_i^2 (PCIc - 2d_i) + c^2 d_i^2}}{c^2 - v_i^2} \quad (6)$$

$$s_{N_{ds}}(t'+\hat{t}, t_d) = A\lambda_N(t_d)(t'+\hat{t})^2 e^{\frac{2(t'+\hat{t})}{65}} \sin(2\pi f_c t') \quad (13)$$

رابطه (۱۳) که پالس مطلوب شیفت یافته است یک پالس استاندارد با  $\tau = -\hat{t}$  است. بنابراین علاوه بر دامنه، ECD پالس مطلوب نیز تابعی از تاخیر پالس‌های دریافتی است. با توجه به رابطه (۱۱) شکل پوش پالس نامطلوب شبیه پوش پالس استاندارد نیست و در  $t_{d_i}$  ضرب شده است. همچنین فاز حامل پالس نامطلوب با فاز حامل پالس مطلوب متفاوت است. بنابراین پوش و فاز پالس نامطلوب با پالس مطلوب کاملاً متفاوت بوده و براساس پالس استاندارد قابل تعریف نیست. در نتیجه پالس نامطلوب حاوی کل اعوجاج پالس میانگین است. برای تعیین میزان اعوجاج، یک ثابت تناسب به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\rho_N(t_d) = \frac{s_{N_{ds}}^{max}(t_d)}{s_{N_{ms}}^{max}(t_d)} \quad (14)$$

که در آن  $s_{N_{ds}}^{max}(t_d)$  بیشینه اندازه پوش پالس مطلوب و  $s_{N_{ms}}^{max}(t_d)$  بیشینه اندازه پوش پالس نامطلوب پالس میانگین است.

### نرخ سیگنال به نویز پالس میانگین

با فرض گوسی و WSS بودن نویز جمع شده با پالس‌های دریافتی، توان نویز پالس میانگین ( $P_N^n$ ) با هر میزان تاخیر با ضریب  $1/N$  نسبت به توان نویز  $N$  پالس ورودی ( $P_{in}^n$ ) کاهش می‌یابد، یعنی:

$$\frac{P_N^n}{P_{in}^n} = \frac{1}{N} \quad (15)$$

با فرض  $\rho_N(t_d) \gg 1$  و  $\psi_N(t_d) \approx 0$ ، توان پالس میانگین ( $P_N^s$ )،  $\lambda_N^2(t_d)$  برابر توان پالس‌های ورودی ( $P_{in}^s$ ) است:

$$\frac{P_N^s}{P_{in}^s} = \lambda_N^2(t_d) \quad (16)$$

بنابراین اگر نرخ سیگنال به نویز پالس‌های ورودی برابر  $SNR_{in}$  باشد نرخ سیگنال به نویز پالس میانگین به صورت زیر خواهد بود:

$$SNR_N = \frac{P_N^s}{P_{in}^s} = \frac{P_{in}^s \lambda_N^2(t_d)}{P_{in}^s (1/N)} = SNR_{in} N \lambda_N^2(t_d) \quad (17)$$

بنابراین اگر  $\lambda_N^2(t_d) > 1/N$  باشد میانگین‌گیری از پالس‌های تاخیر یافته موجب افزایش نرخ سیگنال به نویز می‌شود. در ادامه مقدار  $\lambda_N(t_d)$  برای  $t_d$  ها و  $N$ های مختلف محاسبه شده است.

نسبت به زمان مرجع با  $t_d = [t_{d_0}, t_{d_1}, \dots, t_{d_{N-1}}]$  تعریف می‌شود که در آن  $t_{d_i} = t_{d_{i-1}} + \tau_{d_i}$ ;  $i=1, \dots, N-1$  و  $t_{d_0} = 0$  است. با فرض  $\varphi = 0$  و  $\tau = 0$  اگر  $N$  عدد متوالی دریافت شود که پالس مشابه  $(i+1)$ -امین PCI نسبت به پالس مشابه اولین PCI به میزان  $t_{d_i}$  ثانیه تاخیر داشته باشد،  $t_d = [t_{d_0}, t_{d_1}, \dots, t_{d_{N-1}}]$  پالس میانگین به صورت زیر خواهد بود:

$$s_N(t, t_d) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} s(t - t_{d_i}) \quad (8)$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} A(t - t_{d_i})^2 e^{\frac{2(t-t_{d_i})}{65}} \sin(2\pi f_c(t - t_{d_i})); t \geq 0$$

### بخش مطلوب و نامطلوب پالس میانگین

رابطه (۸) به صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$s_N(t, t_d) = \frac{AB_N(t_d)}{N} t^2 e^{\frac{2t}{65}} \sin(2\pi f_c t - \psi_N(t_d)) \quad (9)$$

$$+ \frac{A}{N} \sum_{i=1}^{N-1} (t_{d_i}^2 - 2t t_{d_i}) e^{\frac{2(t-t_{d_i})}{65}} \sin(2\pi f_c(t - t_{d_i})); t \geq 0$$

که در آن مقادیر  $B_N(t_d)$  و  $\psi_N(t_d)$  به صورت زیر هستند:

$$B_N(t_d) = \sqrt{\left( \sum_{i=0}^{N-1} e^{\frac{2t_{d_i}}{65}} \cos(2\pi f_c t_{d_i}) \right)^2 + \left( \sum_{i=0}^{N-1} e^{\frac{2t_{d_i}}{65}} \sin(2\pi f_c t_{d_i}) \right)^2} \quad (10)$$

$$\psi_N(t_d) = \arctan \left( \frac{\sum_{i=0}^{N-1} e^{\frac{2t_{d_i}}{65}} \sin(2\pi f_c t_{d_i})}{\sum_{i=0}^{N-1} e^{\frac{2t_{d_i}}{65}} \cos(2\pi f_c t_{d_i})} \right)$$

رابطه (۹) از دو بخش تشکیل شده است. بخش اول پالسی است با پوشی مشابه پوش پالس استاندارد که پالس مطلوب نامیده شده و بخش دوم پالسی است با پوشی نامشابه پالس استاندارد که پالس نامطلوب نامیده شده است. پالس مطلوب  $s_{N_{ds}}(t, t_d)$  و نامطلوب  $s_{N_{ms}}(t, t_d)$  رابطه (۹) به صورت زیر هستند:

$$s_{N_{ds}}(t, t_d) = A\lambda_N(t_d) t^2 e^{\frac{2t}{65}} \sin(2\pi f_c t - \psi_N(t_d)), \quad (11)$$

$$s_{N_{ms}}(t, t_d) = \frac{A}{N} \sum_{i=1}^{N-1} t_{d_i} (t_{d_i} - 2t) e^{\frac{2(t-t_{d_i})}{65}} \sin(2\pi f_c(t - t_{d_i}))$$

سیگنال مطلوب  $s_{N_{ds}}(t, t_d)$  یک پالس با پوشی دقیقاً برابر با پوش پالس استاندارد است که در یک ضریب تضعیف دامنه  $\lambda_N(t_d) = B_N(t_d)/N$  و یک حامل با فاز  $\psi_N(t_d)$  ضرب شده است. اگر فاز حامل به شکل  $\psi_N(t_d) = 2\pi f_c \hat{t}$  فرض شود،  $s_{N_{ds}}(t, t_d)$  به صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$s_{N_{ds}}(t, t_d) = A\lambda_N(t_d) t^2 e^{\frac{2t}{65}} \sin(2\pi f_c(t - \hat{t})) \quad (12)$$

با تغییر متغیر  $t' = t - \hat{t}$  رابطه (۱۲) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

تخمین است. در این بخش مقادیر مشخصه‌های پالس میانگین برای سناریوهای مختلف محاسبه شده است.

### تحلیل مشخصه‌های پالس میانگین

شکل‌های ۴، ۵ و ۶ پارامترهای ضریب تضعیف دامنه، فاز حامل که نماینده ECD است و ثابت تناسب که نسبت بیشینه دامنه پالس مطلوب به بیشینه دامنه پالس نامطلوب است را نشان می‌دهند. فرکانس مرکزی پالس لورن-سی ۱۰۰ کیلوهرتز و دوره تناوب پالس ۱۰ میکروثانیه است. بنابراین اگر تاخیر آخرین پالس بیش از ۵ میکروثانیه باشد اختلاف فاز برخی از پالس‌ها بیش از ۱۸۰ درجه شده و جمع آن‌ها موجب تضعیف پالس میانگین می‌شود. بنابراین رفتار اعوجاج نتیجه شده از میانگین پالس‌ها با تاخیر کمتر از ۵ میکروثانیه تفاوت قابل توجهی نسبت به تاخیر بیش از ۵ میکروثانیه دارد. به همین منظور این دو بازه تاخیر با هدف افزایش شفافیت مقادیر و کاهش در هم‌تنیدگی نمودارها جدای از هم رسم شده‌اند. برای سادگی، در این بخش تمام نتایج براساس فرض  $t_{d_i} = \frac{it_d}{N-1}; i=0, \dots, N-1$  بدست آمده‌اند. در شکل ۴ مقدار  $\lambda_N(t_d)$  نسبت به  $N$ ها و  $t_d$ های ۱ تا ۱۰ میکروثانیه رسم شده است. در تمامی شکل‌ها، پالس PCI اول به عنوان مرجع در نظر گرفته شده و در مقدار  $N$  محاسبه نشده است.

با توجه به شکل ۴  $\lambda_N(t_d)$  برای  $t_d$ های کوچک نزدیک یک است و برای  $t_d < 5\mu s$  با افزایش  $N$  افزایش می‌یابد. بنابراین طبق رابطه (۱۷) و با فرض  $\lambda_N(t_d) \approx 1$  با افزایش  $N$  مقدار  $SNR_N$  افزایش می‌یابد. بنابراین با توجه به بیشینه مقدار خطای الگوریتم تعیین گذر از صفر سوم کمینه مقدار  $SNR_N$  محاسبه شده و طبق رابطه (۱۷) و  $SNR_{in}$  کمینه مقدار  $N$  بدست می‌آید.

در شکل ۴ (الف) کمترین مقدار  $\lambda_N(t_d)$  به  $t_d = 5\mu s$  و  $N = 2$  تعلق دارد زیرا دوره تناوب حامل ۱۰ میکروثانیه است و جمع دو سیگنال با تاخیر ۵ میکروثانیه موجب می‌شود سیگنال‌های مثبت یک پالس با سیگنال‌ها منفی پالس دیگر جمع شوند. همین اتفاق برای  $N$ های بزرگتر با تاخیرهای بیشتر افتاده است. نمودارهای شکل ۴ (ب) روند ثابتی نسبت به  $N$  و  $t_d$  ندارند؛ نکته قابل توجه این است که برای  $N = 2$  و  $t_d = 10\mu s, t_d = 9\mu s$  مقدار  $\lambda_N(t_d)$  بزرگتر از یک شده است. دلیل این امر آن است که هر سیگنال پالس تاخیر یافته با سیگنال بعدی پالس بدون تاخیر میانگین‌گیری شده است.

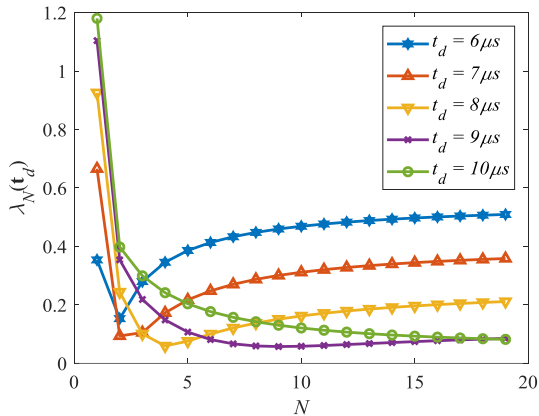
### جمع‌بندی عوامل موثر بر دقت تعیین گذر از صفر سوم

موارد مطرح شده در بخش‌های قبل را می‌توان اینگونه جمع‌بندی کرد که توزیع خطای یک الگوریتم تعیین گذر از صفر سوم تابعی از SNR، ECD و اعوجاج پالس میانگین است. نتیجه میانگین‌گیری از  $N$  پالس یکسان جمع شده با نویز مستقل و گوسی با میانگین صفر و واریانس یکسان یک پالس مشابه پالس ورودی است که واریانس نویز آن با نسبت  $1/N$  کاهش یافته و SNR آن با نسبت  $N$  افزایش یافته است [۳۰]. با توجه به رابطه (۹) و (۱۰) فقط در شرایط  $t_{d_i} = 0; i=0, \dots, N-1$  روابط  $\lambda_N(t_d) = 1, \psi_N(t_d) = 0$  برای پالس مطلوب برقرار بوده و پالس نامطلوب نیز برابر صفر است؛ لیکن اگر برای حتی یکی از  $t_{d_i} \neq 0$ ها باشد  $\lambda_N(t_d) \neq 1, \psi_N(t_d) \neq 0, s_{N_m}(t, t_d) \neq 0$  نیز تنها در شرایط  $t_{d_i} = 0; i=0, \dots, N-1$  ممکن است برقرار شود. بنابراین پالس میانگین تنها برای گیرنده ساکن ممکن است دچار اعوجاج نشود و در گیرنده متحرک اعوجاجی متناسب با بردار حرکت گیرنده خواهد داشت.

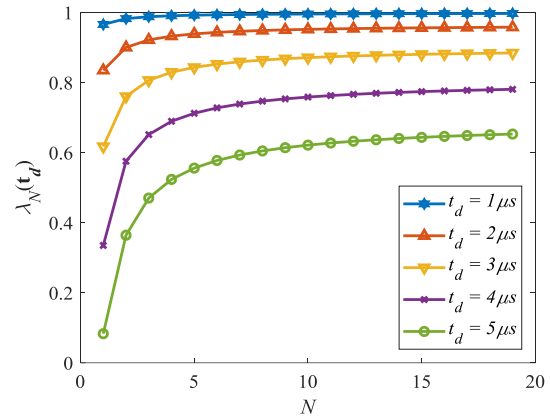
به صورت کلی، تاخیر پالس‌های دریافتی ناشی از حرکت گیرنده موجب ایجاد  $ECD \neq 0$  و  $\lambda_N(t_d) \neq 1$  در پالس مطلوب و  $\rho_N(t_d) \neq \infty$  به دلیل وجود پالس نامطلوب می‌شود. با این حال، اگر  $\rho_N(t_d)$  به اندازه کافی بزرگ باشد که بتوان از پالس نامطلوب صرف‌نظر کرد، برای دستیابی به یک توزیع خطای تعیین گذر از صفر سوم مشخص، کافی است  $SNR_N$  از یک آستانه مشخص بیشتر و ECD از یک آستانه مشخص کم‌تر باشند. آستانه‌ها توسط الگوریتم تعیین گذر از صفر سوم تعریف می‌شوند. همچنین با داشتن بردار سرعت گیرنده و پارامترهای زنجیره می‌توان تخمینی از میزان اعوجاج پالس میانگین و در نتیجه دقت تعیین گذر از صفر سوم و زمان دریافت پالس میانگین بدست آورد.

### شبیه‌سازی و تحلیل عددی

در بخش‌های قبلی پالس میانگین با مشخصه‌های  $\lambda_N(t_d)$  و ECD پالس مطلوب،  $SNR_N$  و  $\rho_N(t_d)$  تعریف شدند. با داشتن  $N, \lambda_N(t_d)$  و ECD پالس مطلوب و جهت حرکت گیرنده و پارامترهای زنجیره، آستانه سرعت گیرنده برای تعیین گذر از صفر سوم با دقت مشخص قابل محاسبه است. همچنین با داشتن بردار سرعت گیرنده و پارامترهای زنجیره،  $N, \lambda_N(t_d)$  و ECD قابل محاسبه بوده و دقت تعیین گذر از صفر سوم قابل



(ب)

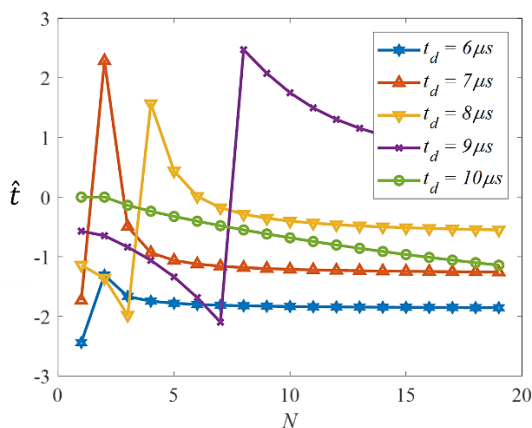


(الف)

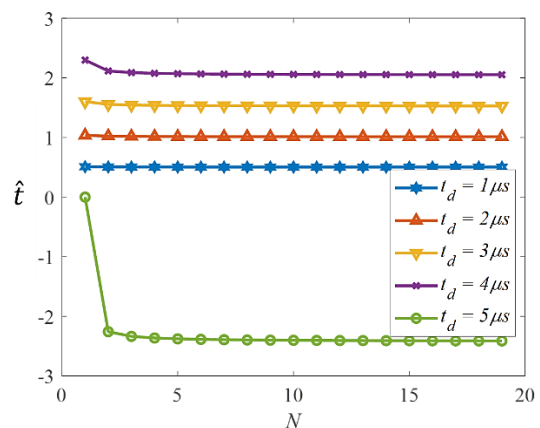
شکل ۴. تغییرات ضریب دامنه پالس مطلوب نسبت به  $N$  و  $t_d$  های از الف) ۱ تا ۵ میکروثانیه و ب) ۶ تا ۱۰ میکروثانیه

مطلوب وابستگی زیادی به تعداد پالس‌های میانگین‌گیری شده ندارد. برای  $t_d < 4\mu s$  نیز مقدار ECD بین صفر تا  $2/5$  میکروثانیه است ولی برای  $t_d = 5\mu s, N \geq 2$  مقدار ECD بیش از  $2/5$  میکروثانیه و بنابراین  $\hat{t}$  حدوداً برابر  $2/5$  میکروثانیه است. در شکل ۵ الف) مقدار ECD در  $N=2$  و  $t_d=5\mu s$  حدوداً صفر است زیرا پالس مطلوب نتیجه شده از جمع دو سیگنال با تاخیر ۵ میکروثانیه حدوداً صفر است و برای آن ECD قابل محاسبه نیست. طبق شکل ۵ ب) برای  $t_d > 5\mu s$  نیز روند ثابتی برای ECD مشاهده نمی‌شود. به صورت کلی اگر ECD بیشتر از  $2/5$  میکروثانیه باشد الگوریتم تشخیص گذر از صفر سوم دچار خطا می‌شود [۳].

شکل ۵ مقدار  $\hat{t} = \psi_N(t_d) / 2\pi f_c$  که نماینده ECD است را نسبت به  $t_d$  و  $N$  نشان می‌دهد. مقدار  $\psi_N(t_d)$  توسط رابطه (۱۰) محاسبه شده است؛ در رابطه (۱۰) داریم  $-\pi/2 \leq \psi_N(t_d) \leq \pi/2$  و در نتیجه  $\hat{t}$  بزرگتر مساوی  $2/5$  میکروثانیه و کوچکتر مساوی  $2/5$  میکروثانیه است. چون پالس مرجع با پالس‌های تاخیر یافته میانگین‌گیری می‌شود مقدار ECD همواره بزرگتر از صفر است. در این صورت اگر مقدار ECD از  $2/5$  میکروثانیه بزرگتر باشد و روند صعودی داشته باشد مقدار  $\hat{t}$  به محدوده مقدار  $2/5$  میکروثانیه شیفت پیدا می‌کند و روند صعودی خواهد داشت؛ بنابراین اندازه ECD در تمام نمودارهای شکل ۵ ب) بیش از  $2/5$  میکروثانیه است. شکل ۵ الف) نشان می‌دهد که برای  $N > 3$  مقدار ECD پالس



(ب)



(الف)

شکل ۵. مقدار  $\hat{t} = \psi_N(t_d) / 2\pi f_c$  که نماینده ECD است نسبت به  $N$  و  $t_d$  های از الف) ۱ تا ۵ میکروثانیه و ب) ۶ تا ۱۰ میکروثانیه

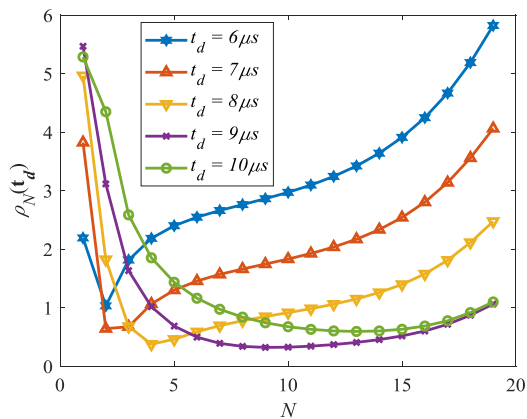
نامیده شده است را نمایش می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود ثابت تناسب برای  $t_d < 5\mu s$  با افزایش  $N$  افزایش یافته

شکل ۶ نسبت بیشینه اندازه پوش پالس مطلوب به بیشینه اندازه پوش پالس نامطلوب پالس میانگین که ثابت تناسب

موجب ایجاد تاخیر در دریافت پالس‌ها در PCI‌های متوالی می‌شود. میزان تاخیر ایجاد شده در دریافت پالس‌ها تابعی از پارامترهای زنجیره، موقعیت اولیه و بردار سرعت گیرنده است. در این مقاله روابط تعیین آستانه سرعت حرکت گیرنده برای تعیین زمان دریافت پالس با دقت مشخص و همچنین تعیین آستانه دقت تعیین زمان دریافت با سرعت مشخص گیرنده ارائه شده است. آستانه سرعت گیرنده و یا آستانه دقت اندازه‌گیری زمان دریافت به ایستگاه فرستنده‌ای وابسته است که بیشترین تاخیر را در دریافت پالس‌ها ایجاد می‌کند. بیشترین تاخیر زمانی، برای پالس‌های فرستنده‌ای که گیرنده در جهت و یا خلاف جهت آن حرکت می‌کند ایجاد می‌شود. بنابراین در یک زنجیره بیشترین تاخیر مربوط به پالس‌های فرستنده‌ای است که جهت حرکت گیرنده کمترین زاویه را با خط واصل گیرنده و آن فرستنده می‌سازد.

فرض کنید یک گیرنده در یک زنجیره ( $PCI = 150ms$ ) با سرعت یک ماخ ( $334$  متر بر ثانیه) در جهت دور شدن از یک فرستنده که  $300$  کیلومتر با آن فاصله دارد حرکت می‌کند  $\gamma_i = \pi; i = 1, \dots, 20$ . براساس روابط این مقاله میزان افزایش SNR قابل محاسبه است. تاخیر پالس مشابه  $20$  عدد PCI متوالی دریافت شده ( $t_d$ )، ضریب تضعیف ( $\lambda_N(t_d)$ )، ثابت تناسب ( $\rho_N(t_d)$ )، تفاضل پوش به سیکل ( $ECD$ ) و SNR پالس میانگین  $SNR_N$  به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} t_d &= [0, 0.167, 0.334, \dots, 3.173]_{\times 20} \mu s \\ \lambda_N(t_d) &= 0.8686, \quad ECD = 1.617 \mu s \\ \rho_N(t_d) &= 14.22, \quad SNR_N / SNR_m = 15.09 \end{aligned} \quad (18)$$



(ب)

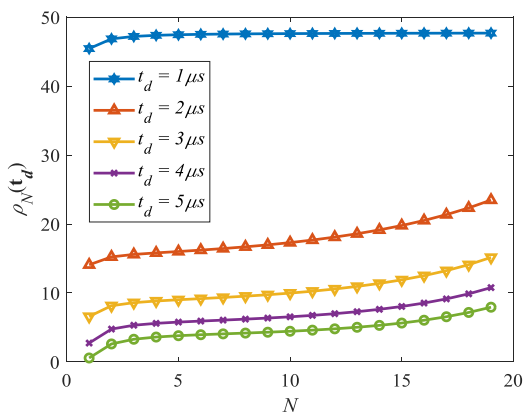
بر ثانیه برای Nهای مختلف در شکل ۷ آورده شده است.

و با افزایش  $t_d$  کاهش می‌یابد. برای  $t_d > 5 \mu s$  ثابت تناسب روند ثابتی نسبت به  $N$  و  $t_d$  نشان نمی‌دهد.

طبق شکل ۴ برای  $t_d < 5 \mu s$  ضریب تضعیف با افزایش  $N$  افزایش می‌یابد و برای  $N > 20$  مقداری بزرگ‌تر از  $0.6$  دارد. ضریب تضعیف برای تاخیر  $t_d > 5 \mu s$  حتی برای  $N$ های بزرگ، کوچکتر از  $0.5$  است. طبق شکل ۵ مقدار ECD برای  $t_d < 3 \mu s$  حدوداً  $1.5 \mu s$  است و با تغییرات  $N$  حدوداً ثابت است. با اینکه برای برخی  $t_d$ ها و  $N$ ها در شکل ۵ (ب) مقدار ECD نسبتاً کوچک است ولی باید توجه نمود که  $-\pi/2 < \psi_N(t_d) < \pi/2$  است و ECDهای نمایش داده شده در واقع بزرگ‌تر از  $2.5 \mu s$  هستند. ثابت تناسب  $\rho_N(t_d)$  نیز برای برخی  $t_d$ ها و  $N$ ها در شکل ۶ نمایش داده شده است. ثابت تناسب برای  $t_d \leq 1 \mu s$  یعنی ده درصد دوره تناوب پالس استاندارد قابل ملاحظه است. عموماً برای افزایش SNR پالس‌های ورودی به اندازه  $17$  دسیبل حداقل  $50$  عدد PCI باید دریافت شود. با توجه به شکل‌های ۴، ۵ و ۶ از بین مشخصه‌های پالس میانگین، ECD بیشترین محدودیت را ایجاد می‌کند زیرا حتی برای  $t_d < 4 \mu s$  مقدار آن بزرگ‌تر از  $2 \mu s$  است.

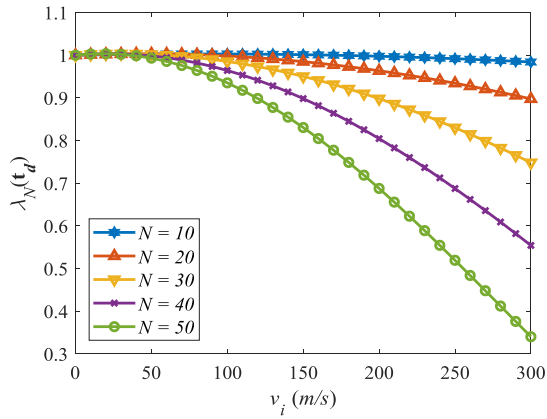
### آستانه سرعت گیرنده برای موثر بودن روش میانگین دیجیتال خطی

گیرنده برای تعیین زمان دریافت و افزایش SNR پالس نیازمند میانگین‌گیری از پالس‌های هم‌فاز دریافتی است. حرکت گیرنده

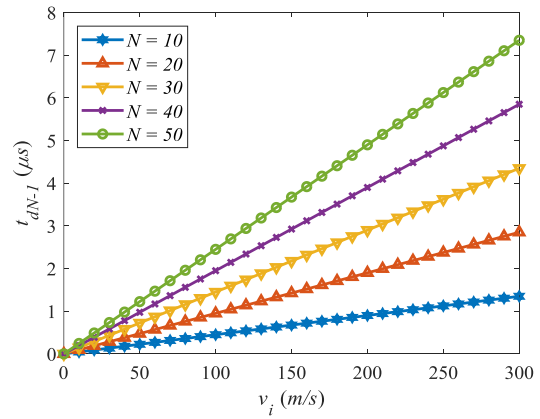


(الف)

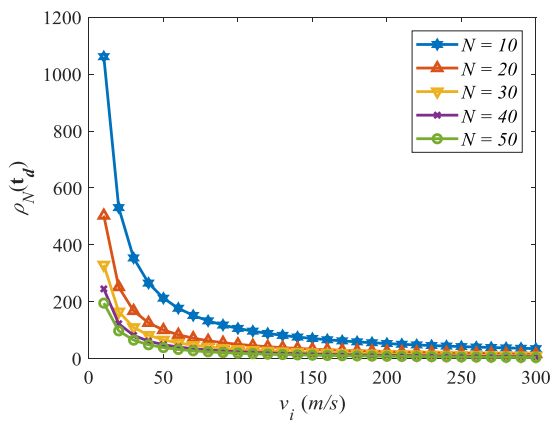
شکل ۶ نسبت به بیشینه دامنه پالس مطلوب به بیشینه دامنه پالس نامطلوب (ثابت تناسب) نسبت به  $N$ ها و  $t_d$ های از الف) ۱ تا ۵ میکروثانیه و ب) ۶ تا ۱۰ میکروثانیه بنابراین در سرعت یک ماخ برای افزایش SNR به میزان  $10 \log 15.09 = 11.76 dB$  پالس میانگین دچار  $ECD = 1.617 \mu s$  شده است که برای برخی الگوریتم‌های گذر



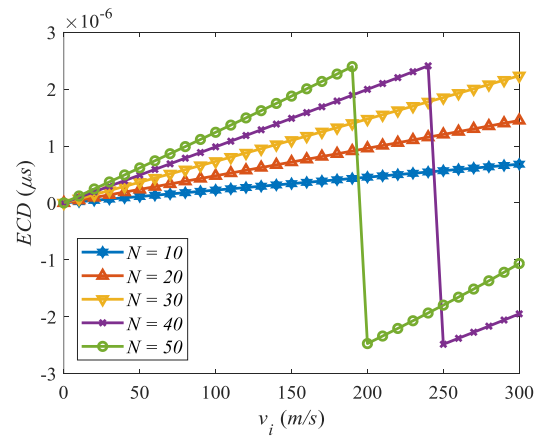
(ب)



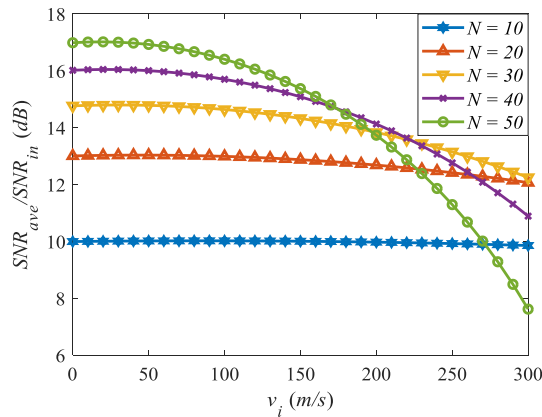
(ف)



(د)



(ج)



(ه)

شکل ۷. (الف) آخرین تاخیر پالس  $(t_{dN-1})$ ، (ب) ضریب تضعیف  $\lambda_N(t_d)$ ، (ج) تفاضل پوش به سیکل (ECD)، (د) ثابت تناسب  $\rho_N(t_d)$  و (ه) اندازه افزایش نرخ سیگنال به نویز پالس میانگین  $SNR_{ave}/SNR_{in}$  برای سرعت‌های مختلف گیرنده در حال حرکت در مسیر دور شدن از فرستنده برای  $N$ های مختلف

که هرچه  $N$  افزایش می‌یابد روند کاهش  $SNR_N/SNR_{in}$  نسبت به سرعت افزایش می‌یابد. مطابق شکل ۷ برای هر  $ECD$  و  $SNR_N/SNR_{in}$  مطلوب الگوریتم تعیین گذر از صفر سوم، می‌توان آستانه سرعت گیرنده را محاسبه کرده و مشخصه‌های

با توجه به شکل ۷ با افزایش سرعت و  $N$ ، تاخیر پالس‌های دریافتی و  $ECD$  افزایش و ضریب تضعیف پالس مطلوب و ثابت تناسب پالس مطلوب و نامطلوب کاهش می‌یابند. روند تغییر  $SNR_N/SNR_{in}$  برای  $N$ های مختلف متفاوت است؛ به گونه‌ای

براساس تخمین بردار سرعت گیرنده و جبران سازی ECD از طریق مرجع قرار دادن پالس PCI انتهایی و قرینه کردن علامت ECD استفاده نمود.

## مراجع

[1] D. D. Wang, X. L. Xi, L. L. Zhou, Y. R. Pu and J. S. Zhang, "Pulse Parabolic Equation Method for Loran-C ASF Prediction Over Irregular Terrain," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters vol. 17, no. 1, pp. 168-171, 2018.

[۲] محمد ادیسیان، علیرضا آزموه اردلان، «نیاز به سیستم تعیین موقعیت ملی مکمل سیستم‌های تعیین موقعیت ماهواره‌ای خارجی در زمان صلح و جایگزین آن‌ها در مواقع بحرانی»، نشریه‌ی سپهر، ۱۳۸۵.

[3] A. K. Z. Tehrani and A. Pourmohammad, "Loran-C cycle identification and ECD estimation in presence of white Gaussian noise," IEEE 10th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT), pp. 1-4, 2016.

[4] M. Bayat and M. H. Madani, "Analysis of Cross-Rate Interference Cancellation by Use of a Novel Phase Code Interval in Loran Navigation System," Navigation, vol. 64, no. 3, pp. 365-376, 2017.

[5] M. Bayat and M. H. Madani, "Loran phase code revisited for continuous wave interference cancellation," IET Science, Measurement & Technology, vol. 11, no. 3, pp. 322-330, 2016.

[6] M. Fartookzadeh, S. H. Mohseni Armaki, S. M. J. Razavi and J. Rashed-Mohassel, "Fast method for the calculation of radiation resistance of a catenary element antenna applied to the optimization of a Loran transmitter antenna and a scaled model fabrication," Journal of Electromagnetic Waves and Applications, vol. 28, no. 9, pp. 1044-1055, 2014.

[7] T. Celano, C. Biggs, B. Peterson and K. Shmihluk, "Modernized LORAN-C timing test bed status and results," in Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition, pp. 824-829, 2005.

[8] W. Ecker, *Loran-C User Handbook*, Office of Navigation Safety, 1992.

دیگر پالس میانگین را ملاحظه نمود. با توجه به دقت عمده الگوریتم‌های تعیین گذر از صفر سوم می‌توان آستانه تاخیر برابر ده درصد دوره تناوب پالس استاندارد را به عنوان قاعده سرانگشتی در نظر گرفت. بنابراین با توجه به شکل ۷ در سرعت یک ماخ کمتر از ۱۰ پالس را می‌توان در پیش‌پردازش میانگین دیجیتال خطی شرکت داد. در صورتی که افزایش SNR پس از میانگین‌گیری از ۱۰ پالس برای داشتن دقت مناسب زمان دریافت پالس کافی باشد موقعیت محاسبه شده قابل اطمینان خواهد بود.

## نتیجه‌گیری

میانگین‌گیری از پالس‌های دریافتی در یک گیرنده متحرک با سرعت بالا علی‌رغم افزایش نرخ سیگنال به نویز، موجب اعوجاج پالس میانگین می‌شود. دقت الگوریتم تعیین گذر از صفر سوم علاوه بر SNR پالس میانگین و ECD، به شباهت پالس میانگین به پالس استاندارد وابسته است. در این مقاله با تفکیک پالس میانگین به دو بخش مطلوب و نامطلوب امکان تعریف اعوجاج پالس میانگین با مشخصه‌های شناخته شده‌ای مانند ECD و ضریب تضعیف دامنه ایجاد شده است. همچنین با ارائه رابطه بین میزان تاخیر پالس با بردار حرکت گیرنده، میزان اعوجاج پالس میانگین به صورت تابعی از بردار حرکت گیرنده ارائه شده است. الگوریتم‌های تعیین گذر از صفر سوم معمولاً دقت تعیین زمان دریافت پالس را به صورت تابعی از SNR و ECD ارائه می‌دهند. در نتیجه با چارچوب تحلیلی ارائه شده در این مقاله می‌توان تخمین مناسبی از دقت اندازه‌گیری زمان دریافت پالس نسبت به بردار سرعت گیرنده ارائه داد. از طرف دیگر با مشخص بودن آستانه‌های SNR و ECD، می‌توان آستانه سرعت گیرنده را برای اطمینان از دقت کافی الگوریتم تعیین گذر از صفر سوم و همچنین دقت مورد نظر در مکان‌یابی محاسبه نمود. مطابق شبیه‌سازی‌ها، آستانه تاخیر برابر ده درصد دوره تناوب پالس استاندارد برای آخرین پالس دریافتی را می‌توان به عنوان قاعده سرانگشتی برای تعیین آستانه سرعت گیرنده قبول نمود. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که برای سرعت‌های خیلی بالا مانند یک ماخ میانگین‌گیری به حدی اعوجاج ایجاد می‌کند که تشخیص زمان دریافت برای عمده الگوریتم‌ها ممکن نیست. برای بهبود این شرایط در فعالیت‌های آتی می‌توان از روش‌هایی مانند جبران‌سازی تاخیر پالس

- States.” *Navigation: Journal of the Institute of Navigation*, 64(3), 339-349, 2017.
- [21] D. D. Wang, X. L. Xi, Y. R. Pu, J. F. Liu and L.-L. Zhou, “Parabolic equation method for Loran-C ASF prediction over irregular terrain,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 734-737, 2016.
- [22] P. W. Son, S. G. Park, K. Seo, S. Park, and T. H. Fang, “Preliminary study of the re-radiation effect of Loran signal to improve the positioning accuracy.” In *2019 European Navigation Conference (ENC)* (pp. 1-4). IEEE, April 2019.
- [23] Y. Wenhe, H. Yu, Y. Jiangbin, Z. Kunjuan and L. Shifeng, “A joint detection method of cycle-identification for loran-C signal,” in *Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), 2017 13th IEEE International Conference on*, Yangzhou, China, 2017.
- [24] J. Safar, P. Williams, A. Grant and F. Vejrazka, “Analysis, Modeling, and Mitigation of Cross-Rate Interference in eLoran,” *Navigation*, vol. 63, no. 3, pp. 295-319, 2016.
- [25] L. Hui-zhen, L. Bin-feng and H. Dong-liang., “Algorithm of matching wave for cycle identification of Loran-C,” *Ship Electronic Engineering*, vol. 28, no. 5, pp. 81-83, 2008.
- [26] A. J. Fisher, “The Loran-C cycle identification problem,” report-university of York, department of computer science YCS, 1999.
- [27] مهدی مدیری، رضا عرب صاحبی، هانیه طباطبایی، ارزیابی روش‌های تخمین تفاضل پوش به سیکل در سامانه‌ی زمین پایه لورن به منظور تعیین موقعیت دقیق و صحیح در شرایط بحران انسان ساخت، دو فصلنامه علمی پژوهشی مدیریت بحران، ۱۳۹۵.
- [28] J. H. Dunlap, “Accurate determination of ship's velocity using LORAN-C,” *Oceans*, vol. 89, no. 3, p. 860-862, 1989.
- [29] Y. Yuan-jiang and G. Qiang, “A Novel Signal Search Algorithm for Loran-C receiver,” *electronic technology*, vol. 4, no. 17, pp. 20-21, 2010.
- [30] V. S. Pugachev, *Probability theory and mathematical statistics for engineers*, Elsevier, 2014.
- [31] RAYNAV 780 *Loran-C navigator manual*, 1993.
- [9] R. H. Shudde, “A Non-iterative Algorithm for Loran-C Position Determination,” *Navigation*, vol. 31, no. 3, pp. 179-199, 1984.
- [10] S. Razin, “Explicit (noniterative) Loran solution,” *Navigation*, vol. 14, no. 3, pp. 265-269, 1967.
- [11] P. Williams and D. Last, “On Loran-C Time-Difference to Co-ordinate Converters,” in *Proceedings-International Loran Association (ILA)-32nd Annual Convention and Technical Symposium*.
- [12] P.-W. Son, J. H. Rhee and J. Seo, “Novel Multi-Chain-Based Loran Positioning Algorithm for Resilient Navigation,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 54, no. 2, pp. 666 - 679, 2017.
- [13] L. S., P. B., B. C. and E. P., “Loran Coverage Availability Simulation Tool,” in *Proceedings of the Royal Institute of Navigation (RIN) NAV08/ International Loran Association 37th Annual Meeting*, 2008.
- [14] D. M. S. a. R. F. Last, “The North- West European Loran-C System: Coverage and Performance Predictions,” *Navigation*, vol. 40, no. 3, pp. 209-226, 1993.
- [15] P. H. Dana, “Geographic Information Systems Loran-C Coverage Modeling,” in *Proceedings of the Twenty-Second Annual Technical Symposium. The Wild Goose Association*, Bedford, MA, 1994.
- [16] M. Lad, F. Van Graas, C. Cutright and D. W. Diggle, “Characterization of Atmospheric Noise in the Loran-C Band,” in *Proceedings of the International Loran Association (ILA-32) Convention and Technical Symposium*, Boulder, Colorado, 2003.
- [17] M. Lad, “Characterization of Atmospheric Noise and Precipitation Static in the Long Range Navigation (Loran-C) Band for Aircraft,” M.Sc. Thesis, Diss. Ohio University, 2004.
- [18] E. D. McConkey, “Evaluation of LORAN- C for Non-Precision Approach Applications,” *Navigation*, vol. 27, no. 3, pp. 189-199, 1980.
- [19] P. W. Son, J. H. Rhee and J. Seo. "Novel multichain-based Loran positioning algorithm for resilient navigation." *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 54.2: 666-679, 2017.
- [20] G. Offermans, S. Bartlett and C. Schue, C. “Providing a resilient timing and UTC service using eLoran in the United