

افزایش دقت مکان‌یابی با استفاده از الگوریتم ترکیبی TOA/TDOA در سامانه زمین پایه لورن

میثم بیات^{۱*}، محمدحسین مدنی^۲

۱- دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی مالک اشتر-هیئت علمی دانشگاه هوایی شهید ستاری

۲- هیئت علمی دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران-دانشکده مخابرات

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۱ تاریخ پذیرش ۹۴/۵/۲۵)

چکیده

در سیستم‌های ناوبری به منظور مکان‌یابی بایستی ابتدا زمان ورود یا اختلاف زمان ورود سیگنال محاسبه و سپس با استفاده از یک الگوریتم مشخص، اختلاف زمانی حاصل را به اطلاعات طول و عرض جغرافیایی تبدیل نمود. در این مقاله، هدف تحلیل الگوریتم‌های ترکیبی تخمین زمان ورود به منظور امکان بهینه‌سازی دقت مکان‌یابی در سامانه‌های مکان‌یاب زمین پایه لورن می‌باشد. بدین منظور ابتدا الگوریتم‌های متداول تخمین زمان ورود (TOA) و تفاضل زمان ورود (TDOA) مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از معیار کارایی CRLB مقایسه شده‌اند. سپس بهبود کارایی با استفاده از معیار RMSE در مقابل افزایش سیگنال به نویز برای روش پیشنهادی با داشتن سه ایستگاه فرستنده در سیستم نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده برای سیگنال لورن در این حالت روش‌های تفاضل زمان ورود و الگوریتم پیشنهادی دارای واریانس نویز کمتری نسبت به روش زمان ورود بوده و در نتیجه دارای خطای کمتری نسبت به روش زمان ورود می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: سیستم لورن، Music، زمان ورود، اختلاف زمان ورود، دنباله‌های تکراری پالس، IFFT

Navigation Accuracy Improvement Using a New Integrated Algorithm of TOA/TDOA in Ground-based Loran Systems

Abstract:

For positioning in navigation systems, at first the signal arrival time or arrival time differences is calculated and then the time differences is converted to geographical Lat/Long information using a specific algorithm. The aim of this study is to analyze the integrated algorithms for estimation of arrival time in order to improve positioning accuracy in ground-based loran systems. For this goal, the common algorithms of arrival time and arrival time difference were investigated firstly and were compared based on CRLB approach. Afterwards, by calculating RMSE index the performance of the suggested algorithm was evaluated using information of three transmitter stations. The results have shown that the proposed approach had promising performance in compare to TOA (the lower noise variances and the minimum error) algorithm.

Keywords: Loran System, Music, Time of Arrival, Time Differences of Arrival, GRI, IFFT

مقدمه

سیستم‌های ناوبری رادیویی که در فرکانس پایین کار می‌کنند، در حقیقت به‌عنوان نیاکان سیستم‌های تعیین موقعیت رادیویی ماهواره‌ای (GNSS) به حساب می‌آیند. پیش از دوران سیستم‌های ماهواره‌ای از فرکانس‌های بالا به دلیل محدود بودن استفاده از آن‌ها به دید مستقیم، استفاده نمی‌شد. این در حالی بود که فرکانس‌های پایین می‌توانستند از طریق انتشار امواج زمینی در فواصل دورتر از افق رادیویی نیز دریافت شوند. مشخصات متفاوت فرکانس و توان سیگنال، سیستم‌های ناوبری فرکانس پایین را از سیستم‌های تعیین موقعیت رادیویی ماهواره‌ای (GNSS) مجزا نموده و در حقیقت این سیستم‌ها به عنوان مکمل یکدیگر به کار می‌روند [۱ و ۲].

لورن C یک سیستم رادیوناوبری زمین‌پایه است که در طیف فرکانس رادیویی ۹۰ تا ۱۱۰ کیلوهرتز عمل می‌کند. این سیستم انتشار امواج زمینی را به عنوان ابزار اصلی ارسال به کار می‌برد و به بازه دید مستقیم برای کاربران محدود نمی‌شود. لورن C خدمات ناوبری برای کاربردهای تجاری، نظامی، هوایی، دریایی و زمینی ارائه می‌کند [۳].

این سیستم‌ها برای مکان‌یابی و ناوبری بر اساس دنباله‌های تکراری پالس عمل می‌نماید. معمولاً تعداد پالس‌هایی که در یک ثانیه ارسال می‌شود، PRF^۱ نامیده می‌شود و دوره زمانی هر پالس برابر با معکوس PRF پالس‌ها می‌باشد. سیستم‌های لورن (LORAN^۲) به منظور مکان‌یابی یک هدف، بر اساس اختلاف زمانی پالس‌های رسیده از فرستنده‌های اصلی^۳ و پیرو^۴ که در یک شبکه چندگره‌ای قرار می‌گیرند، عمل می‌کنند. برای هر اختلاف زمانی یک خط مکان‌یاب یا LOP^۵ برای جفت فرستنده اصلی - پیرو تولید می‌شود و مکان گیرنده از محل تقاطع دو یا چند LOP، بسته به این‌که از گروه چندگره‌ای استفاده شده باشد، به دست خواهد آمد [۴]. از روش‌های تخمین فرکانس مختلفی برای تخمین TOA استفاده شده است که عبارتند از: روش‌های مبتنی بر تجزیه مقادیر ویژه^{۱۰} مانند اسپریت [۴، ۵، ۶، ۷]، پیزارنکو [۵-۷] و روش مبتنی بر عکس تبدیل فوریه سریع (IFFT^{۱۱}) [۴ و ۵]. مبنای روش TDOA محاسبه تفاضل زمان ورود سیگنال‌های رادیویی از یک زوج ایستگاه ثابت (پایه - پیرو) می‌باشد. در مقالات [۸ و ۹] تخمین موقعیت به‌وسیله روش هیپربولیکی در دو مرحله انجام شده است. راه دیگر گرفتن همبستگی متقابل بین دو سیگنال

دریافتی در دو ایستگاه و تنظیم پارامتر زمانی برای یافتن لحظه وقوع پیک است. در این روش نیازی به داشتن نسخه مشابه سیگنال فرستنده نیست و مخصوصاً هنگامی که مشخصات سیگنال ارسالی در ابتدا مشخص نیست مناسب است [۱۰].

در این مقاله، روش استخراج اختلاف زمان‌های تولید شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای استخراج اختلاف زمانی می‌توان از دو روش متداول زمان ورود (TOA) و تفاضل زمان ورود (TDOA) استفاده نمود. پس از محاسبه «زمان ورود/ اختلاف زمان ورود»، باید به‌گونه‌ای این زمان به دست آمده را به مکان تبدیل نمود. معمولاً دو روش برای تبدیل اختلاف زمانی به یک مکان جغرافیایی وجود دارد. یک روش قدیمی استفاده از نمودارهایی است که به شبکه تأخیر زمانی^۸ معروفند و هر نمودار شامل خطوط تأخیر زمانی بوده که ناوبر قادر است تأخیر زمانی به دست آمده را به کمک این نمودارها به یک مکان جغرافیایی تبدیل نماید. در این روش ابتدا اختلاف زمانی توسط گیرنده محاسبه شده و در ادامه، کاربر با توجه به اختلاف زمانی به دست آمده به کمک چارت‌ها و جداول مخصوص و یک سری ضرایب تصحیح موقعیت گیرنده را تعیین می‌کند. در روش دوم به کمک الگوریتم‌های مختلف تبدیل زمان به مکان از جمله روش‌های چان، تیلور و به‌کمک پردازش کامپیوتری می‌توان اختلاف زمانی به دست آمده را به اطلاعات طول و عرض جغرافیایی تبدیل نمود.

در ادامه و در بخش ۲ روش تعیین موقعیت به کمک TOA مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش ۳ روش تعیین موقعیت به کمک TDOA مورد بررسی قرار گرفته و در بخش ۴ یک روش ترکیبی به منظور افزایش دقت مکان‌یابی ارائه گردیده است. در بخش ۵ این روش‌ها با هم مقایسه و روش مناسب برای مکان‌یابی سیستم‌های لورن پیشنهاد شده است. در انتها نتایج شبیه‌سازی برای تخمین TOA و TDOA و مقایسه آن‌ها با روش پیشنهادی در سیستم‌های لورن آورده شده است.

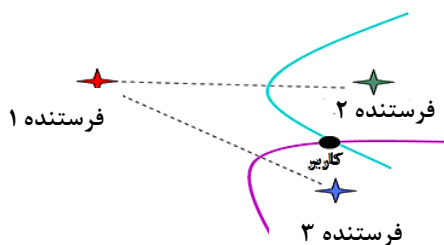
روش تعیین موقعیت به کمک TOA [۱۱]

در روش TOA موقعیت صحیح هدف در دو بعد را با داشتن حداقل سه ایستگاه می‌توان بدون ابهام به دست آورد. مختصات هدف تنها نقطه فصل مشترک سه دایره است. اندازه‌گیری‌های فاصله که ناشی از اندازه‌گیری‌های زمان TOA است، در معرض

شود. در نهایت با حل این معادلات، موقعیت گیرنده تعیین می‌شود. البته در روش شبکه تأخیر زمانی که در آن با استفاده از هذلولی‌هایی که روی هر کدام یک تأخیر زمانی درج شده و قطع دادن حداقل سه هذلولی برای یافتن موقعیت بدون ابهام دویبعدی هدف، لازم است اطلاعات اختلاف زمانی را به کمک چارت‌های زمانی به موقعیت مکانی تبدیل می‌نمایند.

روش‌های تخمین TDOA [۹و۸]

مبنای روش TDOA محاسبه تفاضل زمان ورود سیگنال‌های رادیویی از یک زوج ایستگاه ثابت (اصلی - ثانویه) می‌باشد. با توجه به شکل (۱) می‌توان زمان TD یعنی تفاضل زمان ورود از دو ایستگاه اصلی (فرستنده ۱) و ثانویه (فرستنده ۲ یا ۳) را مشاهده نمود. بر اساس این زمان (TD) خطوط مکان‌یاب LOP^{12} برای جفت ایستگاه‌های پایه-پیرو در یک زنجیره استخراج می‌شود.



شکل ۱- مبنای تفاضل زمان ورود در ایستگاه‌های اصلی و ثانویه [۱۰]

مدل هندسی برای تخمین مختصات موقعیت با استفاده از تفاضل زمان ورود، فصل مشترک هذلولی‌ها در دو بعد و فصل مشترک هذلولی‌گون‌ها در سه بعد می‌باشد. هذلولی را به این صورت می‌توان توضیح داد که تفاضل فاصله‌ها ($d_2 - d_1$) هر نقطه روی هذلولی از دو کانون یک مقدار ثابت است. اگر نقطه روی شاخه سمت راست هذلولی قرار گرفته باشد، تفاضل مثبت است و اگر روی شاخه سمت چپ قرار گرفته باشد، منفی است. در حالت کلی دو روش برای تخمین TDOA وجود دارد: ۱- روش خودهمبستگی ۲- روش همبستگی متقابل. در روش خودهمبستگی می‌توان از ویژگی‌های سیگنال دریافتی استفاده کرد، به این صورت که بین یک نسخه مشابه سیگنال ارسال شده با سیگنال دریافتی همبستگی گرفته می‌شود و از لحظه وقوع پیک برای به دست آوردن زمان ورود استفاده می‌شود.

عوامل تخریبی مختلفی مانند نویز، تداخل کانال، چند مسیری^۹ و پالس ساعت غیر دقیق می‌باشند. دقت موقعیت‌یابی به‌وسیله مشارکت تعداد بیشتری از ایستگاه‌هایی که در فرایند تعیین موقعیت حضور دارند می‌تواند افزایش یابد.

الگوریتم Music [۱۲ ۶،۷]

برای تخمین TOA از الگوریتم Music که در واقع یک الگوریتم تخمین پارامتر سیگنال چندفازی است استفاده می‌شود. الگوریتم به صورت اساسی و پایه شبیه الگوریتم پیزارنکو است؛ اما این الگوریتم از تعداد زیادی فیلتر ویژه اغتشاش (بر خلاف الگوریتم پیزارنکو که فقط از یک فیلتر استفاده می‌کند) استفاده می‌نماید.

برای به دست آوردن بردارها و مقادیر ویژه وابسته، روش تجزیه مقادیر ویژه در ماتریس خودهمبستگی \hat{R}_x با اندازه $(M \times M)$ به کار رفته است. M-P کمترین تعداد مقادیر ویژه‌ای است که برای تخمین واریانس نویز $\hat{\sigma}_w^2$ نیاز است.

$$\hat{\sigma}_w^2 = \frac{1}{M-P} \sum_{m=P+1}^M \lambda_m \quad (1)$$

تخمین فرکانس می‌تواند با پیدا کردن P ریشه از چندجمله‌ای $D(z)$ انجام شود.

$$D(z) = \sum_{m=P+1}^M U_m(z) U_m^*(1/z^*) \quad (2)$$

$$U_m(z) = \sum_{m=0}^{M-1} u_m(m) z^{-m} \quad (3)$$

روش تعیین موقعیت TDOA [۸]

تخمین موقعیت به‌وسیله روش هیپربولیکی در دو مرحله انجام می‌شود [۱۲]. مرحله اول شامل به دست آوردن تفاضل‌های زمانی رسیدن سیگنال از یک منبع است، که این موضوع به وسیله روش‌های تخمین تأخیر رسیدن یک سیگنال به ایستگاه‌های مختلف انجام می‌شود. در مرحله دوم، تفاضل‌های زمانی به تفاضل‌های فاصله بین هدف و ایستگاه‌ها تبدیل می‌شود، که منجر به یک مجموعه معادلات غیرخطی هیپربولیکی می‌شود. در مرحله دوم برای کاهش ابهام ناشی از این معادلات غیر خطی باید از الگوریتم‌های کارآمد استفاده

مقدار آرگومان τ که رابطه (۴) را ماکزیمم می‌کند برابر است با مقدار تفاضل زمان ورود یعنی D ، لذا رابطه (۴) را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$R_{x_1x_2}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x_1(t)x_2(t-\tau)dt \quad (5)$$

از آن جایی که $R_{x_2x_1}(\tau)$ را فقط در یک زمان مشاهده محدود می‌توان محاسبه کرد، بنابراین تخمین همبستگی متقابل به این صورت خواهد بود:

$$\hat{R}_{x_1x_2}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x_1(t)x_2(t-\tau)dt \quad (6)$$

که T بازه مشاهده را نشان می‌دهد.

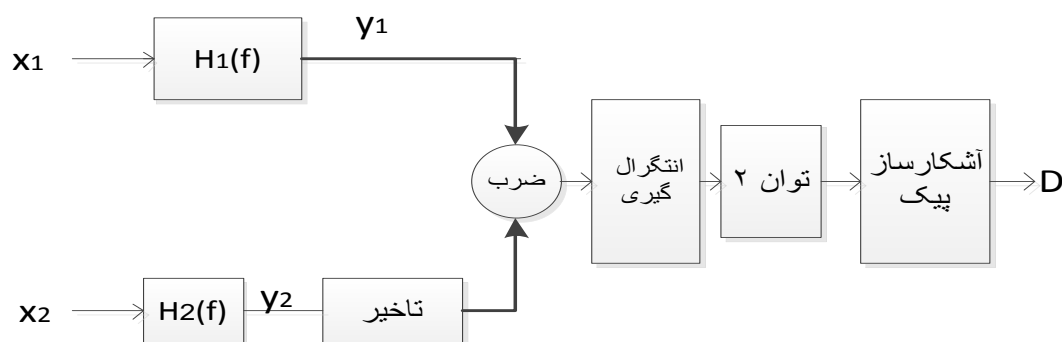
جهت افزایش دقت محاسبه تأخیر، قبل از انتگرال‌گیری در (۶) باید از فیلتر استفاده شود. با توجه به شکل (۲)، هر یک از سیگنال‌های $x_1(t), x_2(t)$ توسط فیلترهای $H_1(t), H_2(t)$ فیلتر می‌شود، سپس همبستگی بین آن‌ها محاسبه می‌شود و به توان دو می‌رسد. این عملیات برای بازه‌ای از شیفتهای زمانی پارامتر τ انجام می‌شود تا حداکثر همبستگی پیدا شود. پارامتر زمانی که باعث به‌وجود آمدن پیک همبستگی متقابل می‌شود معادل تخمین تفاضل زمان ورود (\hat{D}) است.

راه دیگر گرفتن همبستگی متقابل بین دو سیگنال دریافتی در دو ایستگاه و تنظیم پارامتر زمانی برای یافتن لحظه وقوع پیک است. در روش دوم نیازی به داشتن نسخه مشابه سیگنال فرستنده نیست و لذا این روش مخصوصاً هنگامی که مشخصات سیگنال ارسالی در ابتدا مشخص نیست، مناسب است. در ادامه این روش بیشتر مورد توجه قرار گرفته است، زیرا روش رایج‌تر برای تخمین TDOA روش همبستگی متقابل است [۹ و ۱۰].

روش‌های همبستگی متقابل کلی [۱۹-۱۳ و ۲۰]

در این روش‌ها بین سیگنال‌های فیلتر شده دریافتی در دو ایستگاه، همبستگی متقابل گرفته می‌شود و تفاضل زمان ورود (D) بین دو ایستگاه به وسیله تعیین لحظه وقوع پیک همبستگی به دست می‌آید. این پیش فیلترینگ برای تقویت فرکانس‌هایی که در آن‌ها نسبت سیگنال به اغتشاش (SNR) بالاست و برای تضعیف توان اغتشاش قبل از عبور سیگنال از مدار همبستگی لازم است. در روش‌های همبستگی متقابل کلی برای محاسبه TDOA، از رابطه همبستگی متقابل استفاده می‌شود.

$$R_{x_1x_2}(\tau) = AR_x(\tau - D)e^{-j\pi\alpha D} \quad (4)$$



شکل ۲- روش همبستگی متقابل کلی برای تخمین TDOA [۲۰]

در همبستگی متقابل است، که به پردازش همبستگی متقابل مشهور است. پردازنده‌های دیگر عبارتند از: پردازنده پاسخ ضربه راس^[۱۶]، تبدیل همدوس نرم^[۱۴] (SCOT)، فیلتر اکارت^[۱۵] و پردازنده هانون تامسون^[۱۶] یا تخمین‌زننده حداکثر شباهت (ML)^[۱۹].

اگر بخواهیم یک تخمین بایاس نشده TDOA داشته باشیم، فیلترها باید مشخصات فرکانسی و فازی یکسانی داشته باشند و معمولاً باید فیلترهای مشابهی انتخاب شوند [۱۵ و ۱۸]. زمانی که فیلترهای $H_2(f) = H_1(f) = 1$ در تمام فرکانس‌ها باشند، تخمین \hat{G} به سادگی برابر لحظه وقوع پیک

روش پیشنهادی (ترکیب TOA و TDOA)

شروع سیگنال واقع شوند، اندازه‌گیری دامنه در بازه زمانی $t-2.5$ تا $t+2.5$ که بین دو پیک سیگنال است، انجام می‌شود و با توجه به این که نسبت پیک دامنه‌ها در این نقاط منفی است، می‌تواند مبنایی برای تشخیص نقطه عبور از صفر باشد. مقادیر t به دست آمده یا مضربی از $10 \mu s$ است و یا نزدیک به آن است که به نزدیکترین عدد مضرب $10 \mu s$ گرد می‌گردد. نسبت پیک نیم سیکل در زمان t در یک پالس لورن به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$h(t) = \left(\frac{E(t+2.5)}{E(t-2.5)} \right) = \left(\frac{t+2.5}{t-2.5} \right)^2 e^{\frac{10}{65}} \quad (7)$$

مقدار t با تغییر متغیر زیر محاسبه می‌شود:

$$t = \left(2.5 \frac{A+1}{A-1} \right) \quad (8)$$

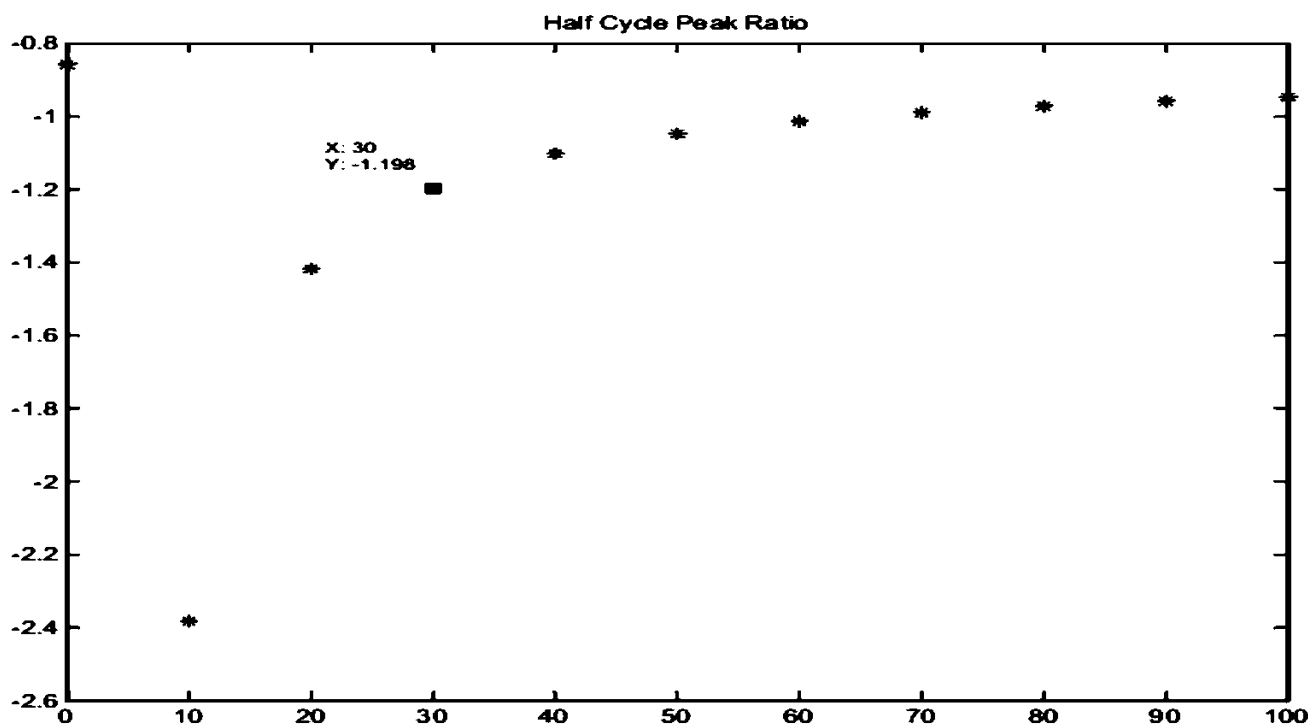
$$A = (\sqrt{h}) e^{\frac{5}{65}} \quad \text{که در آن}$$

در شکل زیر نسبت حداکثر نیم سیکل (h) برای یک پالس لورن در نقاط عبور از صفر افزایشی محاسبه شده است.

در این روش پیشنهادی از ترکیب الگوریتم‌های تخمین فرکانس و الگوریتم‌های تخمین اختلاف زمان ورود برای افزایش دقت و بهبود کارایی استفاده می‌نماییم. الگوریتم پیشنهادی به این صورت است که ما ابتدا با الگوریتم‌های تخمین فرکانس (TOA) زمان ورود را تخمین می‌زنیم و سپس با استفاده از الگوریتم TDOA این کار را تکرار می‌کنیم. در مرحله‌ی بعد با استفاده از زمان‌های به دست آمده از هر روش، نقاط عبور از صفر افزایشی را می‌یابیم. با توجه به این که فرکانس امواج لورن 100 کیلو هرتز می‌باشد، می‌بایست این زمان‌ها مضربی از 10 باشند. سپس نقاط به دست آمده در دو روش را با هم مقایسه می‌کنیم و در هر روشی که این نقاط مضربی از 10 باشند یا اختلاف کمتری نسبت به مضرب 10 داشته باشند، دقیق‌تر بوده و زمان به دست آمده از آن روش را به عنوان زمان ورود سیگنال در نظر می‌گیریم. در ادامه یکی از روش‌های پیدا کردن نقاط عبور از صفر افزایشی را بیان می‌کنیم.

روش نسبت پیک نیم سیکل (HCPR^{۱۷}) [۱۹]

اگر نقاط عبور از صفر افزایشی در زمان t میکرو ثانیه بعد از

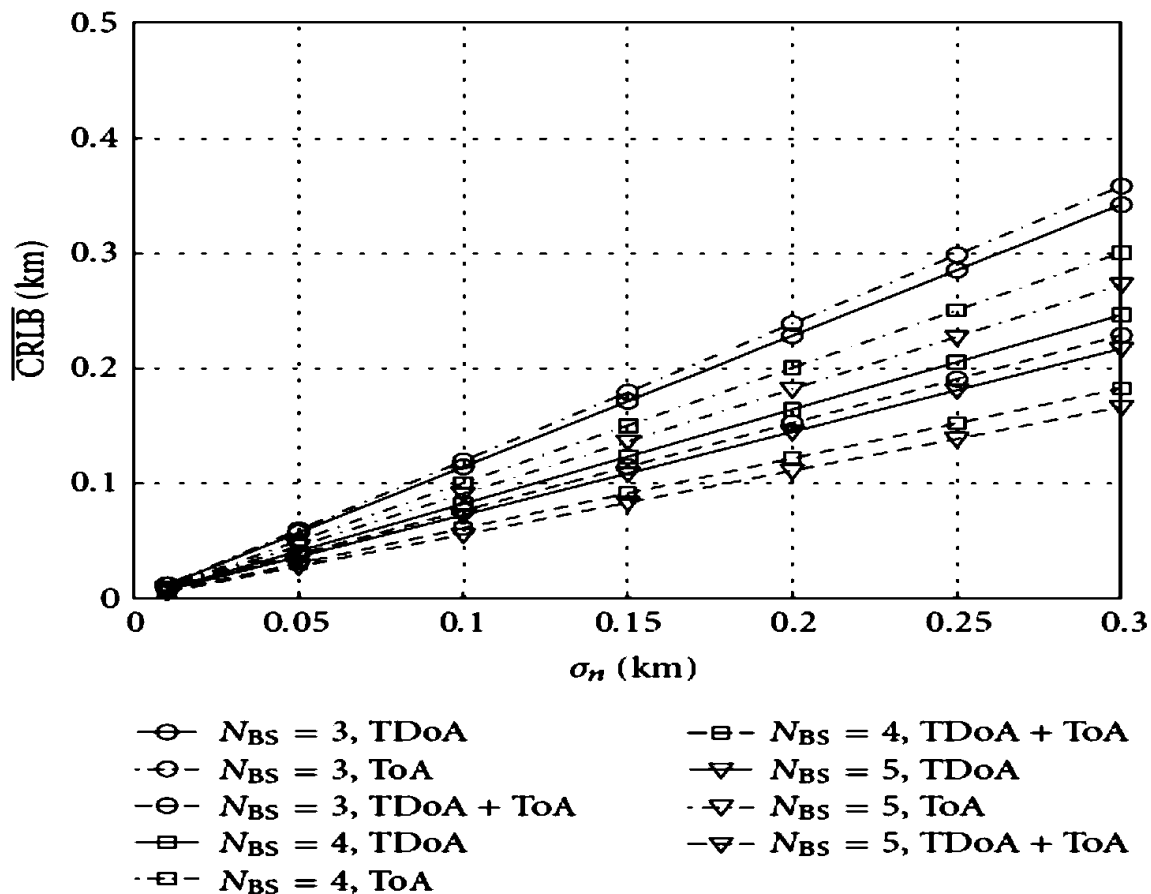


شکل ۳- نسبت پیک نیم سیکل، برای یک پالس لورن در نقاط عبور از صفر افزایشی

مقایسه سیستم‌های تعیین موقعیت [۱۱]

باید توجه داشت که در سیستم‌های تعیین موقعیت لورن معمولاً از روش‌های «زمان ورود/ اختلاف زمان ورود» استفاده می‌شود که باید بین این دو روش مقایسه‌ای انجام شود و تصمیم‌گیری نهایی انجام گردد. در روش TOA نیاز به هم‌زمانی بین ایستگاه‌های گیرنده نبوده و هم‌زمانی بین ایستگاه و گیرنده انجام می‌شود. اگرچه اندازه‌گیری زمان در مسیر رفت و برگشت (RTT^A) می‌تواند مشکل عدم هم‌زمانی بین فرستنده و گیرنده را حل نماید و با استفاده از رابطه بین سرعت انتشار موج و زمان رفت و برگشت، فاصله قابل محاسبه است. اما در روش

فوق نیاز به رفت و برگشت سیگنال در مسیر بوده و فرستنده باید بتواند این کار را انجام دهد؛ که خیلی مطلوب نیست. در حقیقت مشکل مکان‌یابی با استفاده از زمان ورود سیگنال (TOA) این است که معمولاً فرستنده و گیرنده‌ها با هم هم‌زمان نبوده و یک ایستگاه اضافی جهت محاسبه زمان ورود نیاز می‌باشد. بنابراین استفاده از روش TDOA در سیستم‌های لورن ضروری است. اما معیار مقایسه برای کارایی روش TDOA و TOA استفاده از کران پایین کرامر راثو (CRLB) می‌باشد. در شکل (۴) کران پایین خطا برای روش‌های TOA، TDOA و ترکیب آن دو با هم نشان داده شده است.



شکل ۴- CRLB برای مقادیر گوناگون σ_n با توجه به روش‌های گوناگون مکان‌یابی و $R=3km$ [۲۱]

سیستم‌های لورن مبتنی بر روش TDOA [۹ و ۱۱]

در سیستم لورن از روش تعیین موقعیت هیپربولیکی یا روش تفاضل زمان ورود (TDOA)، می‌توان تخمین موقعیت را در دو مرحله به‌دست آورد. در مرحله نخست تفاضل زمان ورود

با توجه به شکل فوق مشاهده می‌شود که به ازاء مقادیر متفاوت ایستگاه‌های ارسال (N_{BS}) روش TDOA دارای σ_n (واریانس نویز) کمتری نسبت به TOA می‌باشد؛ به عبارت دیگر TDOA دارای خطای کمتری نسبت به TOA می‌باشد.

ورود تخمین زده شده سیگنال‌های ایستگاه اصلی از ثانویه به دست می‌آید. خطای تفاضل زمان ورود نسبت به مقدار واقعی را در هر سه حالت می‌یابیم و آن‌ها را با هم مقایسه می‌کنیم.

مراحل انجام شبیه‌سازی برای الگوریتم تخمین TOA شامل سه بخش است. در بخش اول پالس لورن تولید می‌شود. بخش دوم، بلوک تقسیم طیف است؛ در این بخش از پالس لورن $x_c(t)$ ، C در دامنه فرکانسی تبدیل فوریه گرفته می‌شود. سپس طبقه‌بندی طیف با تقسیم طیف پالس دریافت شده $x_c(\omega)$ از پالس استاندارد لورن، $x_g(\omega)$ ساخته خواهد شد. بعد از تقسیم طیف، سیگنال $\hat{H}(\omega)$ به وسیله روش استاندارد پنجره هنینگ^۹، برای رسیدن به حذف پارازیت بزرگ، پنجره‌دار خواهد شد. بخش آخر، تخمین TOA است. تأخیر τ_1 ، τ_2 و τ_3 با استفاده از روش استاندارد Music تخمین زده می‌شود. برای الگوریتم تخمین TDOA با استفاده از رابطه‌ی هم‌بستگی بین سیگنال دریافتی (شامل سیگنال ارسالی از فرستنده اصلی که دارای ۹ پالس (۸ پالس با فاصله $1000 \mu\text{sec}$ و آخرین پالس با فاصله $2000 \mu\text{sec}$) و سیگنال ارسالی از ایستگاه‌های ثانویه شامل ۸ پالس که این پالس‌ها با فاصله زمانی $1000 \mu\text{sec}$ از یکدیگر قرار دارند می‌باشد) و سیگنال‌های m_a ، m_b ، s_a و s_b نقطه‌ی شروع اولین پالس مشخص می‌شود.

در این مرحله برای کاهش حجم محاسبات رابطه‌ی هم‌بستگی برای نمونه‌هایی که دامنه آن‌ها کمتر از $0.9/0$ است، اعمال نمی‌شود. هم‌چنین برای کاهش حجم محاسبات رابطه هم‌بستگی برای 120 میکروثانیه اول پالس لورن محاسبه می‌شود.

الگوریتم تخمین TOA

در شکل (۵) سیگنال دریافتی $X_s(t)$ که مجموع سه پالس لورن با تأخیر $\tau_1 = 20\mu\text{s}$ و $\tau_2 = 80\mu\text{s}$ و $\tau_3 = 150\mu\text{s}$ است، مشاهده می‌شود.

در شکل (۶) استفاده از الگوریتم Music برای تخمین تأخیر، نشان داده شده است. در این شبیه‌سازی سیگنال زمینی با تأخیرهای $\tau_1 = 20\mu\text{s}$ و $\tau_2 = 80\mu\text{s}$ و $\tau_3 = 150\mu\text{s}$ به گیرنده می‌رسد.

در روش عملی برای به‌دست آوردن تأخیرها، ابتدا سیگنال

سیگنال بین حداقل دو جفت از ایستگاه‌ها را به‌دست آورده و در مرحله دوم باید معادلات هیپربولیکی به‌دست آمده از این اندازه‌گیری‌های تفاضل زمان ورود را حل نمود.

برای تخمین تفاضل زمان ورود (TDOA)، روشی که معمولاً بیشتر استفاده می‌شود محاسبه هم‌بستگی متقابل بین سیگنال‌های دریافتی در هر جفت از ایستگاه‌ها می‌باشد. روش‌ها و الگوریتم‌های زیادی برای بهبود دقت هم‌بستگی متقابل وجود دارد. این الگوریتم‌ها به دو دسته کلی قابل تقسیم می‌باشند. دسته اول روش‌های هم‌بستگی متقابل کلی (GCC) هستند که حتماً باید قبل از استفاده از مدار هم‌بستگی متقابل از پیش فیلترینگ سیگنال استفاده شود. این فیلترینگ به‌منظور تضعیف قسمتی از طیف که اغتشاش و تداخل بالا دارد و هم‌چنین برای تقویت قسمتی از طیف که سیگنال به اغتشاش بالا دارد انجام می‌شود. دسته دوم روش‌های هم‌بستگی متقابل دوره‌ای (CCC) هستند. این روش‌ها از تفاوت میان خصوصیات آماری دوره‌ای سیگنال مورد نظر و سایر سیگنال‌های مزاحم برای افزایش دقت تخمین‌های TDOA استفاده می‌کنند. در بین روش‌های موجود برای حل معادلات هیپربولیکی غیرخطی، که از تخمین تفاضل زمان ورود ایجاد شده‌اند، روش سری تیلور، روش فنگ و روش چان روش‌های بهتری ارزیابی شده‌اند. روش چان مناسب‌ترین روش می‌باشد که راه‌حل فرم بسته و دقیقی دارد و می‌تواند از مزیت استفاده از اطلاعات اضافی ناشی از اندازه‌گیری‌های اضافی برای افزایش دقت و کاهش خطای تعیین موقعیت استفاده کند.

نتایج شبیه‌سازی

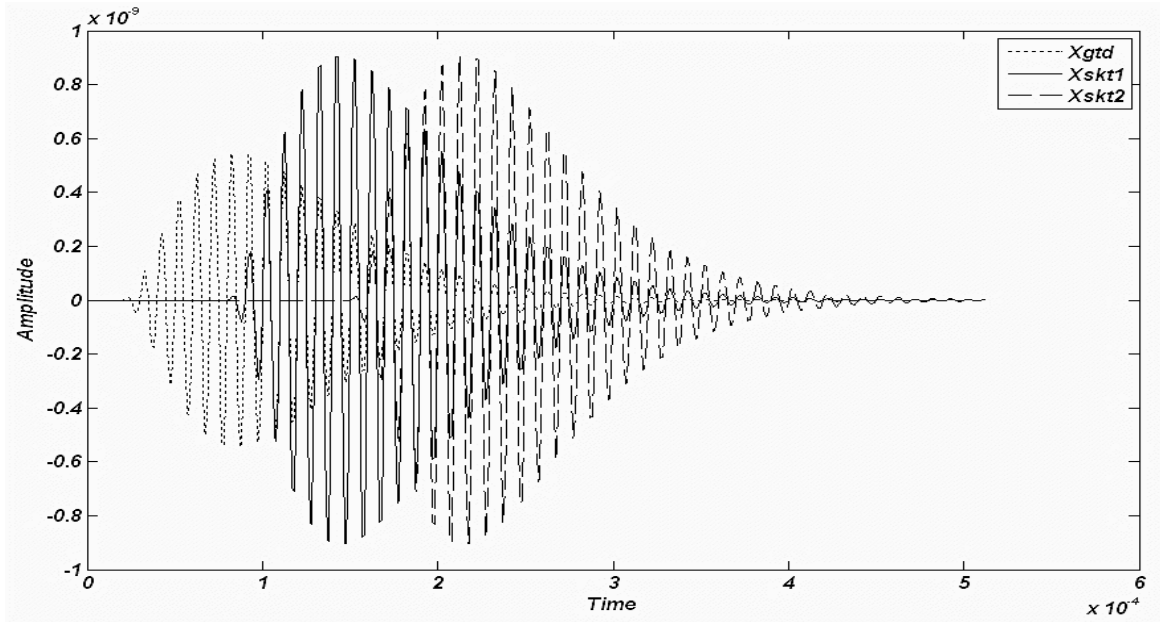
برای نشان دادن بهبود کارایی روش ارائه شده، جذر متوسط مربع خطای تفاضل زمان ورود بین جفت ایستگاه‌های اصلی و ثانویه را برحسب نسبت سیگنال به اغتشاش‌های مختلف در هر سه حالت به‌دست می‌آوریم. جذر متوسط مربع خطای تفاضل زمان ورود از رابطه ۹ به‌دست می‌آید:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} (\text{TD}_{\text{estimate}-i} - \text{TD}_i)^2} \quad i=1,2,3 \quad (9)$$

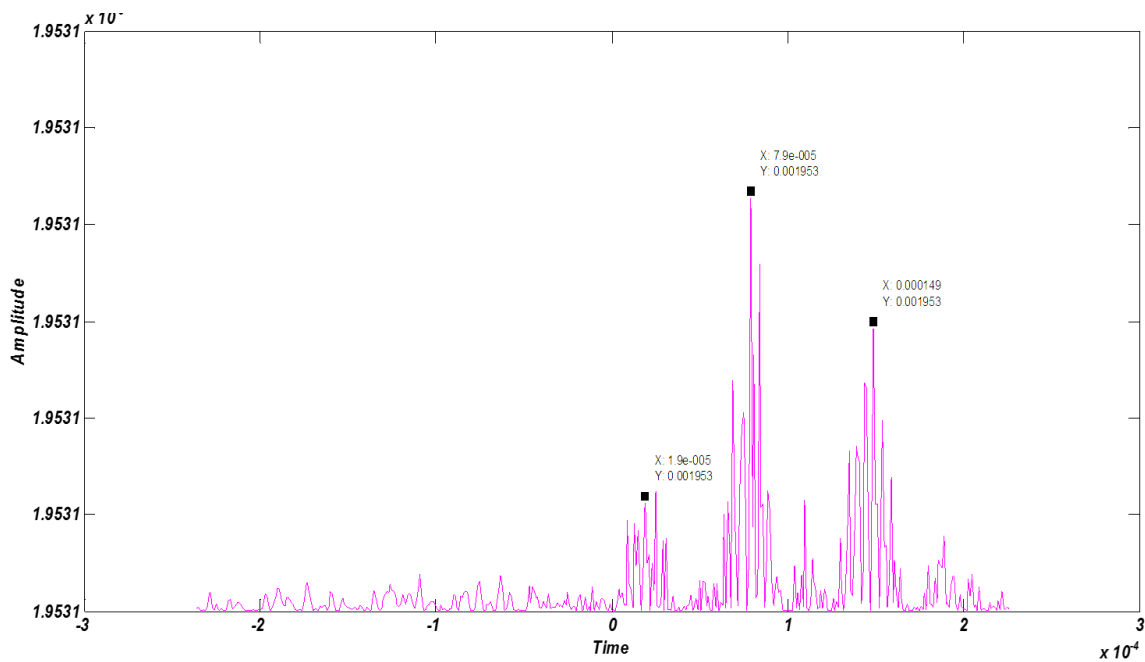
روشن است که بهینه‌ترین روش، روشی است که در آن مقدار RMSE کمتر باشد. تفاضل زمان ورود از تفریق زمان‌های

به دست می‌آید. سپس تأخیرها توسط الگوریتم‌های تخمین فرکانس به دست می‌آیند.

دریافتی فیلتر شده، سپس از این سیگنال و سیگنال لورن C استاندارد، FFT گرفته و آن دو را بر هم تقسیم کرده و Hw



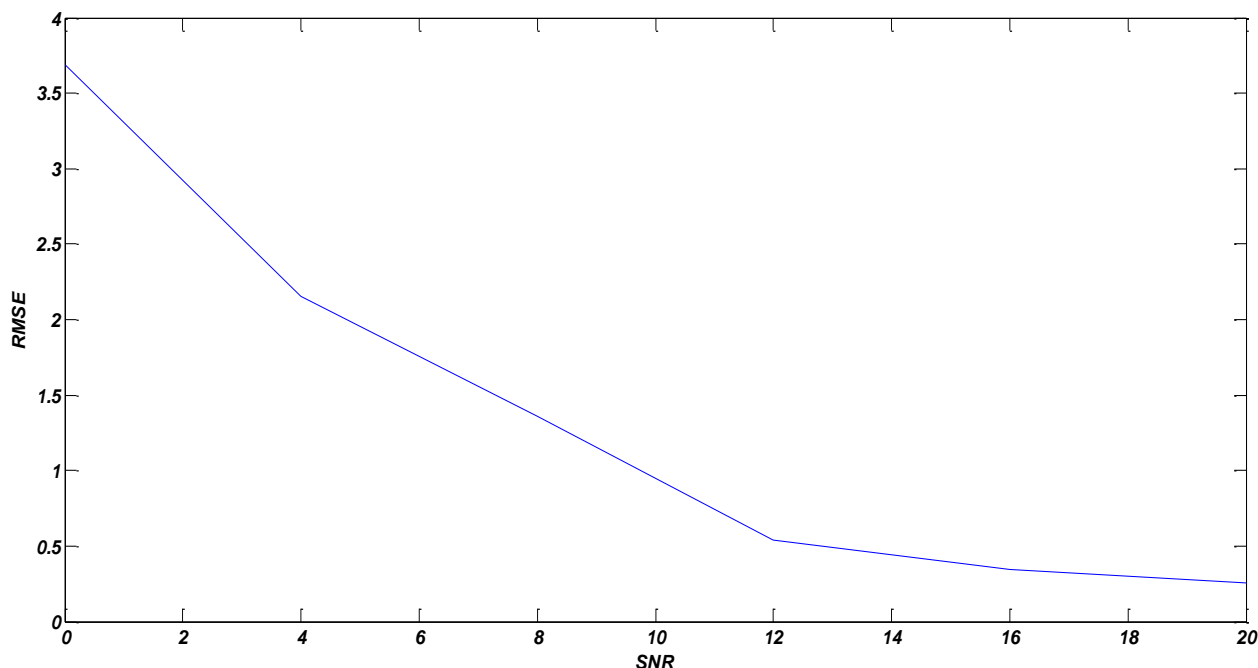
شکل ۵- سه پالس لورن C با تأخیرهای ۱۵۰ و ۲۰،۸۰ میکروثانیه



شکل ۶- تخمین تأخیرها با حضور اغتشاش و استفاده از فیلتر برای تأخیرهای $\tau_1 = 20\mu s$ و $\tau_2 = 80\mu s$ و $\tau_3 = 150\mu s$ با الگوریتم Music

در شکل ۷ (V) نمودار RMSE در مقابل افزایش سیگنال به اغتشاش برای روش MUSIC نشان داده شده است. در این شکل RMSE برای سیگنال به اغتشاش‌های دیده می‌شود با افزایش سیگنال به اغتشاش خطای RMSE برای تخمین TOA کاهش پیدا می‌کند.

در شکل ۷ (V) نمودار RMSE در مقابل افزایش سیگنال به اغتشاش برای روش MUSIC نشان داده شده است. در این شکل RMSE برای سیگنال به اغتشاش‌های



شکل ۷- مقایسه RMSE در مقابل افزایش سیگنال به اغتشاش برای روش MUSIC

تشخیص سیگنال اصلی از ثانویه میسر می‌شود.

در شکل (۸) نتیجه‌ی هم‌بستگی سیگنال ورودی با سیگنال اصلی A و B نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بیشینه مقدار هم‌بستگی سیگنال ورودی با سیگنال اصلی A نزدیک به مقدار ۱ و بیشینه مقدار هم‌بستگی سیگنال ورودی با سیگنال اولیه B نزدیک به مقدار ۰/۵ است. بنابراین مشخص است که اولین سیگنال، سیگنال اصلی A است. در این سیگنال مقدار هم‌بستگی در نقطه $X=24997$ به بیشینه مقدار خود می‌رسد که این نقطه، نقطه شروع سیگنال است.

برای نشان دادن نتایج روش پیشنهادی ابتدا با الگوریتم‌های تخمین فرکانس (TOA) زمان ورود را تخمین می‌زنیم و سپس با استفاده از الگوریتم TDOA این کار را تکرار می‌کنیم. در مرحله‌ی بعد با استفاده از زمان‌های به‌دست آمده از هر روش، نقاط عبور از صفر افزایشی را می‌یابیم، با توجه به این‌که فرکانس امواج لورن ۱۰۰ کیلوهرتز می‌باشد، می‌بایست این زمان‌ها ضربی از ۱۰ باشند. سپس نقاط به‌دست آمده در

الگوریتم تخمین TDOA

در این مرحله، ضمن تشخیص سیگنال اصلی از ثانویه باید A یا B بودن سیگنال نیز تعیین شود. این مرحله با استفاده از رابطه هم‌بستگی انجام می‌شود. ابتدا سیگنال‌های s_a, m_b, m_a و s_b به صورت زیر ساخته می‌شوند:

$$m_a = [1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1] * p(t)$$

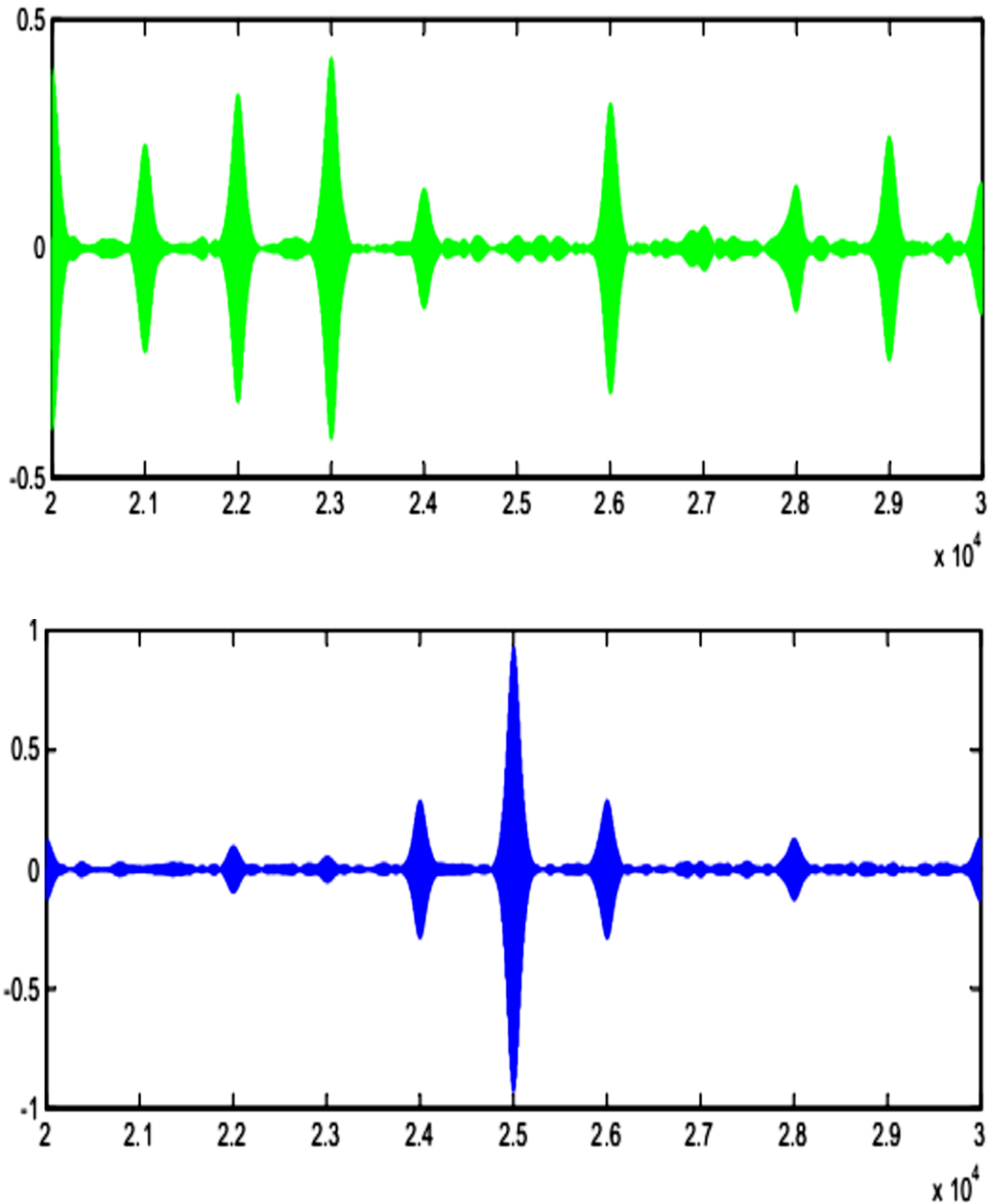
$$m_b = [1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ 1] * p(t)$$

$$s_a = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 1] * p(t)$$

$$s_b = [1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1] * p(t)$$

$p(t)$ پالس لورن ایده‌آل است. سپس هم‌بستگی سیگنال‌های s_a, m_b, m_a و s_b با سیگنال دریافتی، در نقطه‌ی شروع سیگنال محاسبه می‌شود. با استفاده از بیشینه مقادیری که به دست می‌آید، A یا B بودن اولین سیگنال دریافتی و

دو روش را با هم مقایسه می‌کنیم و در هر روشی که این نقاط
مضربی از ۱۰ باشند یا اختلاف کمتری نسبت به مضرب ۱۰
داشته باشند دقیق‌تر بوده و زمان به دست آمده از آن روش را
به عنوان زمان ورود سیگنال در نظر می‌گیریم.

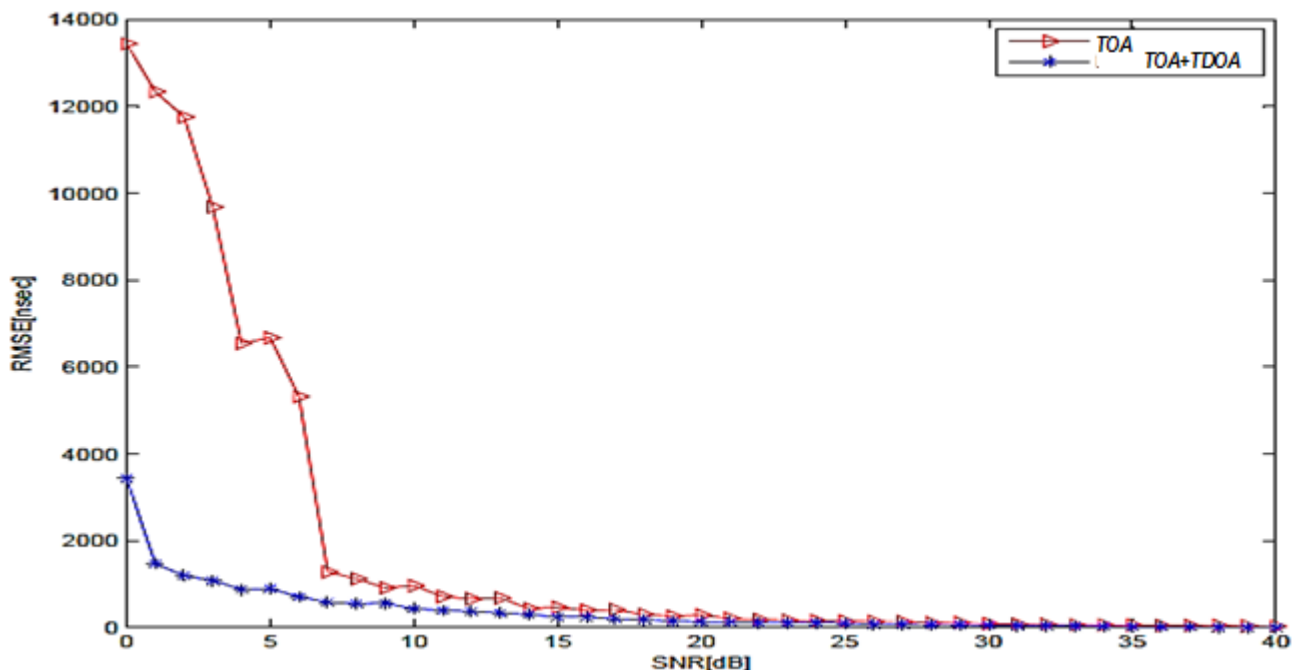


شکل ۸- نتیجه هم‌بستگی سیگنال اصلی A و B با قوی‌ترین سیگنال موجود در زنجیره لورن

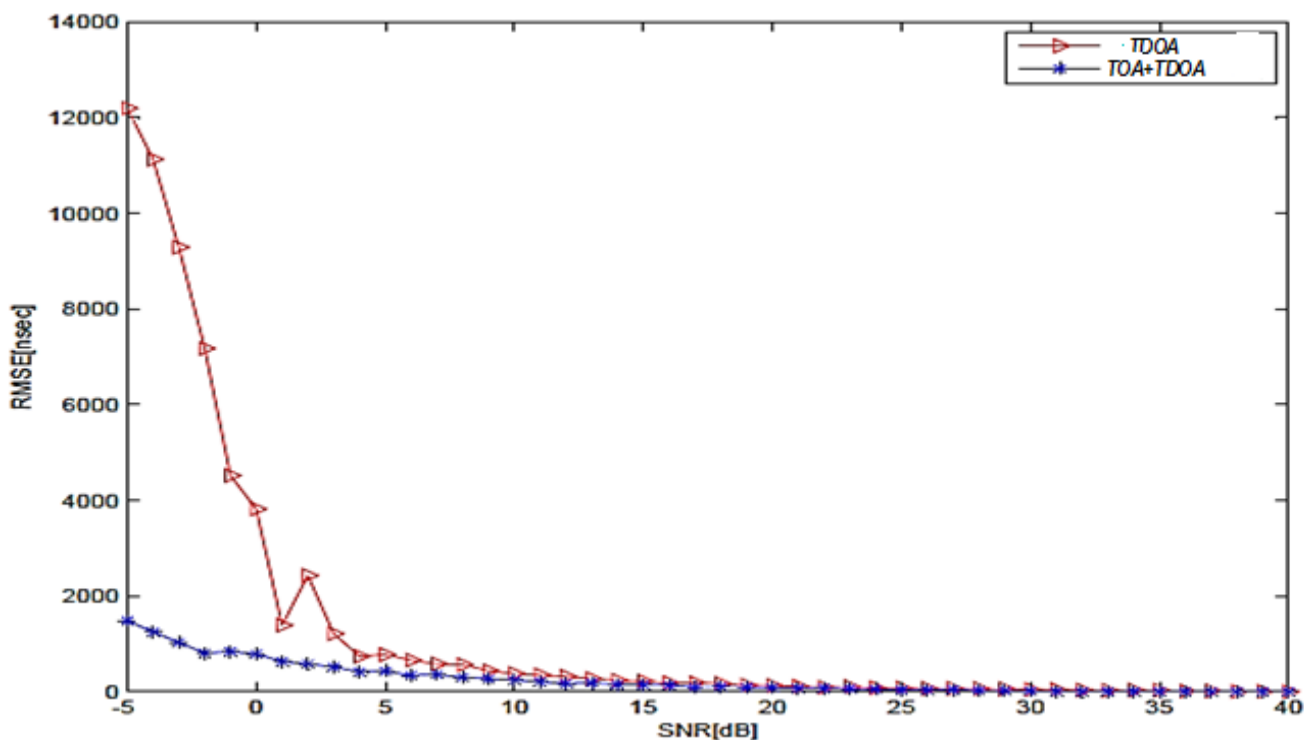
شکل (۹) نمودار RMSE در مقابل افزایش سیگنال به
اغتشاش برای روش پیشنهادی و روش TOA و $N_{BS}=3$ را
نشان می‌دهد. در این شکل RMSE برای سیگنال به
اغتشاش‌های ۰ تا ۴۰db نشان داده شده است. همان‌طور که
در شکل دیده می‌شود با افزایش سیگنال به اغتشاش خطای
RMSE کاهش پیدا می‌کند و روش پیشنهادی عملکرد بهتری
را در شرایط SNRهای مختلف دارد.
در شکل (۱۰) نمودار RMSE در مقابل افزایش سیگنال به
اغتشاش برای روش پیشنهادی و روش TDOA و $N_{BS}=3$ نشان
داده شده است. در این شکل، RMSE برای سیگنال به

شکل (۹) نمودار RMSE در مقابل افزایش سیگنال به
اغتشاش برای روش پیشنهادی و روش TOA و $N_{BS}=3$ را
نشان می‌دهد. در این شکل RMSE برای سیگنال به
اغتشاش‌های ۰ تا ۴۰db نشان داده شده است. همان‌طور که
در شکل دیده می‌شود با افزایش سیگنال به اغتشاش خطای

اغتشاش‌های ۰ تا ۴۰db نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، با افزایش سیگنال به اغتشاش، خطای RMSE کاهش پیدا می‌کند و روش پیشنهادی عملکرد بهتری را در شرایط SNR های مختلف دارد .



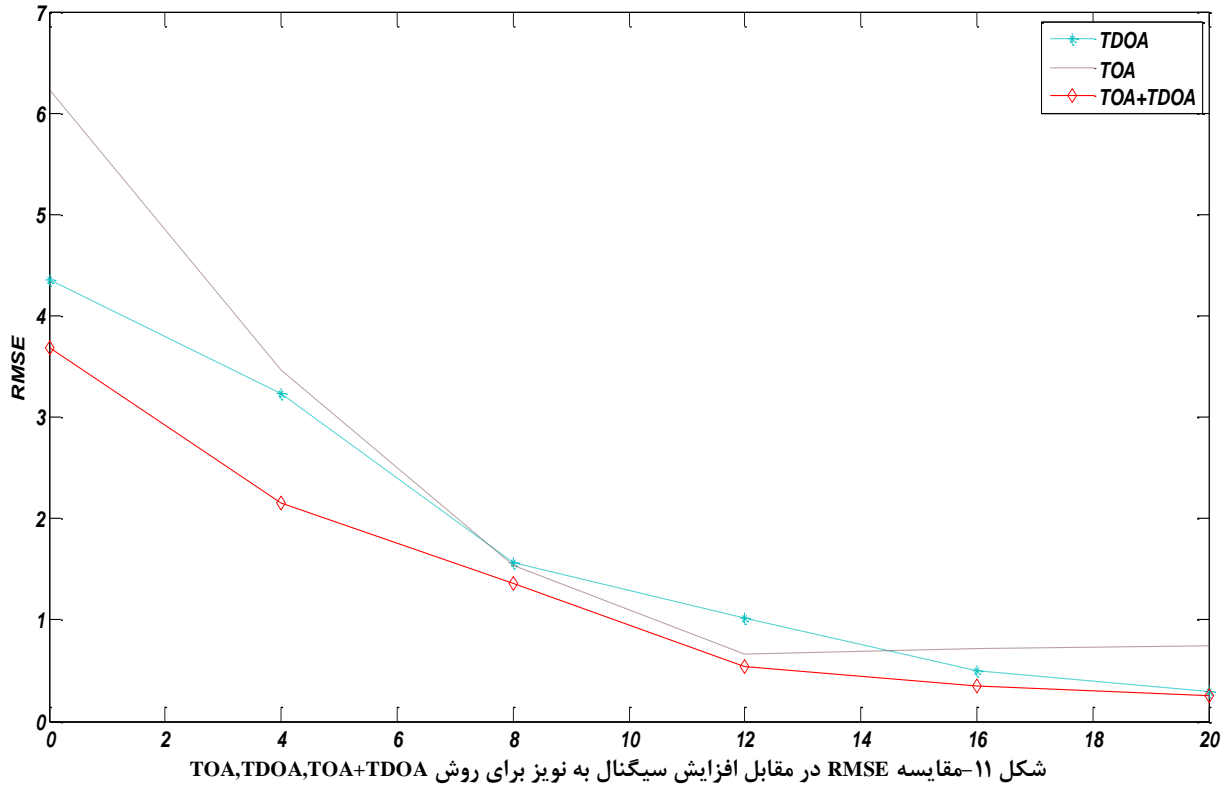
شکل ۹- متوسط مجذور خطای تفاضل زمان‌های ورود در مقابل افزایش سیگنال به نوبز برای مقایسه روش پیشنهادی با روش TOA



شکل ۱۰- متوسط مجذور خطای تفاضل زمان‌های ورود، در مقابل افزایش سیگنال به نوبز برای مقایسه روش پیشنهادی با روش TDOA

بنابراین مزیت روش پیشنهادی این است که باعث می‌شود زمانی که نسبت سیگنال به نویز کم است عبور از صفر سوم را درست تشخیص دهیم و دچار خطای ناشی از انتخاب چرخه‌ی نادرست که باعث خطای مکانی برابر با ۳ کیلومتر می‌شود (چون فرکانس پالس لورن ۱۰۰ کیلوهرتز می‌باشد، هر سیکل اشتباه باعث خطای ۱۰ میکروثانیه است) نشویم.

در نهایت در شکل (۱۱) نمودار RMSE در مقابل افزایش سیگنال به اغتشاش برای روش پیشنهادی و روش TDOA و TOA با $N_{BS}=3$ نشان داده شده است. در این شکل RMSE برای سیگنال به نویزهای ۰ تا ۲۰ db نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، با افزایش سیگنال به نویز خطای RMSE کاهش پیدا می‌کند و روش پیشنهادی بهترین عملکرد را در شرایط SNR های مختلف دارد.



شکل ۱۱- مقایسه RMSE در مقابل افزایش سیگنال به نویز برای روش TOA, TDOA, TOA+TDOA

نسبت به روش TOA می‌باشند؛ به عبارت دیگر دارای خطای کمتری نسبت به روش زمان ورود می‌باشند. از هر روش یک الگوریتم برای سیگنال لورن شبیه‌سازی و عملکرد الگوریتم با افزایش سیگنال به اغتشاش نشان داده شد و مشاهده گردید که در حضور نویز باید سیگنال دریافتی از یک فیلتر عبور نماید. همچنین RMSE برای سیگنال به اغتشاشهای ۰ تا ۲۰ dB نشان داده شد و همان‌طور که مشاهده گردید، با افزایش سیگنال به اغتشاش خطای RMSE کاهش پیدا می‌کند و روش پیشنهادی (TOA+TDOA) بهترین عملکرد را دارد، همچنین روش TOA عملکرد خوبی به خصوص زمانی که نسبت سیگنال

نتیجه‌گیری

در این مقاله برای تخمین اختلاف زمانی در سیستم لورن از سه روش زمان ورود (TOA)، تفاضل زمان ورود (TDOA) و روش پیشنهادی استفاده شد. برای سیستم‌های تعیین موقعیت لورن معیار مقایسه برای کارایی روش‌های تفاضل زمان ورود و زمان ورود با استفاده از کران پایین کرامر راتو (CRLB) انجام و کران پایین خطا برای روش‌های تفاضل زمان ورود و روش پیشنهادی به دست آمد. نشان داده شد که برای سیگنال لورن به ازای مقادیر متفاوت ایستگاه‌های ارسال (N_{BS}) روش TDOA و روش پیشنهادی دارای σ_{rr} (واریانس نویز) کمتری

- [7] A. Mohammed and T. Hult, Detection and minimization of ionospheric interference in loranC receivers, 11th International Conference on Ionospheric radio Systems and Techniques (IRST), 1-6, 2009
- [8] Bin Yang, "DIFFERENT SENSOR PLACEMENT STRATEGIES FOR TDOA BASED LOCALIZATION", IEEE Conference, ICASSP, 2007
- [9] W. A. Gardner " Cyclostationary in Communications and Signal Processing "IEEE Press, 1994.
- [10] W. A. Gardner and Chih -Kang Chen, " Signal Selective Time-Difference-of-Arrival Estimation for Passive Location of Man-Made Signal Sources in Highly Corruptive Environments, Part I: Theory and Method", IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 40, no. 5, pp. 1168,1184, May 1992.
- [11] Bertrand E Fang," Simple Solutions for Hyperbolic and Related Position Fixes", IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS VOL. 26, NO. 5 SEPTEMBER 2011
- [12] Fernand L. , Le Roux Estimation of loranC Skywaves Using Frequency Estimation Techniques. Sweden: Degree of Master of Science in Electrical Engineering ,Department of Telecommunications and Signal Processing, Blekinge Institute of Technology. 2003
- [13] .Chih-Kang Chen and W. A. Gardner, " Signal Selective Time-Difference-of-Arrival Estimation for Passive Location of Man-Made Signal Sources in Highly Corruptive Environments, Part II: Algorithms and Performance", IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 40, no. 5, pp. 1185,1197, May 1992.
- [14] C. H. Knapp and G. C. Carter, The Generalized Correlation Method for Estimation of Time Delay, IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, vol. ASSP-24, no. 4, pp. 320-327, August 1976.
- [15] .G. C. Carter, "Coherence and Time Delay Estimation", Proc. IEEE, vol. 75, pp. 236,255, Feb. 1987.
- [16] P. R. Roth, " Effective Measuremetns Using Digital Signal Analysis", IEEE Spectrum, vol. 8, pp. 62-70, April 1971. 8, pp. 62-70, April 1971.
- [17] W. R. Hahn, " Optimum Signal Processing for Passive Sonar Range and Bearing Estimation",

به اغتشاش کم است از خود نشان نمی‌دهد. بنابراین برای تخمین اختلاف زمانی در سیستم‌های تعیین موقعیت لورن به منظور داشتن حداقل خطا باید به ازای مقادیر متفاوت ایستگاه‌های ارسال (N_{BS}) روش TDOA یا روش پیشنهادی (TOA+TDOA) استفاده گردد.

پی‌نوشت‌ها

- ۱ Pulse Repetition Frequency
- ۲ Long Range Navigation
- ۳ Master
- ۴ Slave
- ۵ Line Of Position
- ۶ Time Of Arrival
- ۷ Time Difference Of Arrival
- ۸ Time Delay Lattice
- ۹ Multi Path
- ۱۰ Eigen-decomposition
- ۱۱ Inverse Fast Fourier Transform
- ۱۲ Line Of Position
- ۱۳ Roth Impulse Response
- ۱۴ Smoothed Coherence Transform
- ۱۵ Eckart
- ۱۶ Hannon-Thomson or Maximum Likelihood
- ۱۷ Half Cycle Peak Ratio
- ۱۸ Round Trip Time
- ۱۹ Haning window

منابع و مراجع

- [1] M. BECKMAN, Carrier wave signals interfering with loranC, Ph.D. thesis, Delft University Press, Delft, The Netherlands, 1992.
- [2] Loran-C User Hand Book, US Department of Transportation, 1992.
- [3] Basic Guide to Advanced Navigation, 2nd Edition, RTO PUBLICATION, Feb2010
- [4] A. Mohammed, F. Le Roux and D. Last, Eigen-decomposition Techniques for Sky wave Interference Detection in loran C receivers, International Loran association, meeting 2013.
- [5] Mohammed, Estimation of loranC Ionospheric signal parameters via ESPRIT algorithm, The Second European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 1-5, 2007.
- [6] Mohammed, F. Le Roux and D. Last, Eigen-decomposition Techniques for Sky wave Interference Detection in loran C receivers, International Loran association, meeting 2012.

[20] C. H. Knapp and G. C. Carter, "The generalized correlation method for estimation of time delay," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. ASSP-24, pp. 320-327, Aug. 1976.

[21] c.Mensing and S.Plass, "Positioning Based on Factor Graphs. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, Volume 2007, pp 1-11, Apr. 2007

Journal of Acoustical Society of America, vol. 58, pp. 201-207, July 1975.

[18] G. C. Carter, "Time Delay Estimation for Passive Sonar Signal Processing", *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. ASSP-29, no. 3, pp. 463-470, June 1981.

[19] Fsher.A.J, "The Loran-c Cycle Identification problem" [http:// www.cs.york.ac.uk ftpdir /reports/ YCS-99-318.pdf](http://www.cs.york.ac.uk/ftpdireports/YCS-99-318.pdf), (2011).