

## ارائه الگوریتم بهبود یافته ترکیبی به منظور تخمین تأخیر امواج آسمانی در گیرنده‌های لورن C

میثم بیات<sup>۱\*</sup>، محمدحسین مدنی<sup>۲</sup>، سید محمدجواد رضوی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی مالک اشتر و مربی دانشگاه هوایی شهید ستاری تهران، دانشکده مهندسی برق

۲- استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران، دانشکده مخابرات

(دریافت: ۹۳/۴/۱۴؛ پذیرش: ۹۴/۲/۲۱)

### چکیده

استفاده از سیستم زمین پایه لورن در ناوبری، به دلیل مصونیت این سیستم در مقابل جمینگ، مورد توجه قرار گرفته است. یکی از مهم‌ترین عوامل خطا در سیستم‌های لورن، تداخل امواج آسمانی با امواج زمینی است. در این مقاله برای تخمین تأخیر امواج آسمانی از الگوریتم‌های تخمین فرکانس (TOA) و تفاضل زمان ورود (TDOA) استفاده شده است. در میان الگوریتم‌های تخمین فرکانس (TOA)، الگوریتم Music بهترین عملکرد را در حضور نویز داشته و الگوریتم پیزارنکو نیز حتی بدون حضور نویز، دارای عملکرد مناسبی نیست. یک الگوریتم پیشنهادی که ترکیب تفاضل زمان ورود و زمان ورود می‌باشد برای بهبود کارایی و افزایش دقت ارائه گردید. الگوریتم‌ها برای سیگنال لورن که شامل موج زمینی و آسمانی است، شبیه‌سازی شده‌اند. همچنین عملکرد الگوریتم‌ها با افزایش سیگنال به نویز نشان داده شده است. با توجه به نتایج به-دست‌آمده برای سیگنال لورن، روش پیشنهادی (ترکیب تفاضل زمان ورود و زمان ورود) دارای  $\sigma_n$  (واریانس نویز) کمتری نسبت به روش زمان ورود و تفاضل زمان ورود می‌باشد، بنابراین خطای RMSE کمتری نسبت به روش زمان ورود و تفاضل زمان ورود دارد. در این مقاله نشان داده شد که الگوریتم پیشنهادی بهبود قابل ملاحظه‌ای در افزایش دقت تخمین تأخیر امواج آسمانی داشته است. میزان خطا در الگوریتم پیشنهادی نسبت به روش TOA، ۰/۰۸٪ و نسبت به روش TDOA، ۱۲/۵٪ به‌دست آمد.

**کلمات کلیدی:** سیستم لورن، پیزارنکو، Music، اسپریت، IFFT، TOA، TDOA

### ۱. مقدمه

شبهانه‌روز بوده، تخمین تأخیر امواج آسمانی از اهمیت زیادی برخوردار است. در واقع سیگنالی که با استفاده از گیرنده‌های لورن C دریافت می‌شود شامل موج زمینی و امواج بازتابی از یونیسفر (امواج آسمانی) می‌باشد. آشکارسازی موج زمینی با بازده بالا با استفاده از تخمین تأخیر امواج آسمانی کامل می‌گردد. از الگوریتم‌های تخمین فرکانس<sup>۱</sup> (TOA) و تفاضل زمان ورود<sup>۲</sup> (TDOA) برای به‌دست آوردن تأخیر امواج آسمانی استفاده شده است. یک روش پیشنهادی که ترکیب تفاضل زمان ورود و زمان ورود می‌باشد برای بهبود کارایی و افزایش دقت ارائه می‌گردد. این روش دارای خطای کمتری نسبت به روش زمان ورود و تفاضل زمان ورود است. تکنیک‌های تخمین فرکانس مختلفی برای تخمین امواج آسمانی استفاده می‌شود که عبارت‌انداز: تکنیک‌های مبتنی بر تجزیه مقادیر ویژه<sup>۳</sup> مانند اسپریت<sup>۴</sup>، Music، پیزارنکو و روش مبتنی بر عکس تبدیل فوریه سریع<sup>۵</sup> (IFFT).

سیستم زمین پایه لورن<sup>۱</sup> یک سیستم ناوبری رادیویی زمینی با برد زیاد است که در فرکانس پایین (۱۰۰ KHz) و با استفاده از ایستگاه‌های زمینی که به صورت زنجیره‌ای سازمان‌دهی شده‌اند، طراحی شده است. فرستنده‌های سیستم لورن C دارای قدرت بالایی هستند، بنابراین سیگنال‌های رسیده به گیرنده دارای توانی چند برابر توان سیگنال دریافتی توسط گیرنده‌های سیستم‌های ماهواره‌ای است. انتشار سیگنال در فرکانس‌های پایین به‌خصوص با توان‌های بالا، نیاز به آنتن‌های بزرگی دارد. بنابراین جمینگ روی سیگنال‌های لورن C در غیر از محدوده‌های کوچک بسیار مشکل است. مهم‌ترین عامل خطا در سیستم‌های لورن، تداخل امواج آسمانی با امواج زمینی است. از آنجا که امواج آسمانی دارای تأخیرهای متفاوت در طول

2-Time Of Arrival

3- Time Difference Of Arrival

4- Eigen-decomposition

5- Estimation of Signal Parameters by Rotational Invariance Techniques

6- Inverse Fast Fourier Transform

\* رایانامه نویسنده مسئول: meysam.bayat302@gmail.com

1- Long Range Navigation

پایان، نتیجه‌گیری از تحلیل‌های صورت گرفته انجام می‌شود.

## ۲- تکنیک‌های تخمین فرکانس [۲، ۳ و ۵]

از تکنیک‌های تخمین فرکانس به منظور تخمین تأخیر امواج آسمانی استفاده می‌شود. این تکنیک‌ها عبارت‌اند از: تکنیک‌های مبتنی بر تجزیه مقادیر ویژه مانند اسپریت [۳-۲، ۶ و ۷]، Music [۳، ۵، ۶]، پیزارنکو [۳، ۵ و ۶] و روش مبتنی بر عکس تبدیل فوریه سریع (IFFT)، [۲، ۷ و ۸].

### ۲-۱- الگوریتم Music [۳، ۵ و ۶]

الگوریتم Music در واقع یک الگوریتم تخمین پارامتر سیگنال چند فازی است. الگوریتم به صورت اساسی و پایه شبیه الگوریتم پیزارنکو است اما این الگوریتم از تعداد زیادی فیلتر ویژه نویز (بر خلاف الگوریتم پیزارنکو که فقط از یک فیلتر استفاده می‌کند) استفاده می‌نماید.

برای به دست آوردن بردارها و مقادیر ویژه وابسته، تکنیک 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  $D(z)$  که در نزدیک‌ترین فاصله به دایره واحد قرار دارند، انجام شود.

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

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

### ۲-۲- الگوریتم IFFT [۲، ۷ و ۸]

در این قسمت، تکنیکی مبتنی بر تحلیل فوریه به منظور شناخت امواج آسمانی در گیرنده لورن  $C$  معرفی می‌شود. سیگنال  $x(\omega)$  از  $p$  تا سینوسی به صورت  $s(\omega)$  و نویز گوسی سفید  $w(\omega)$  تشکیل شده است. این تکنیک با عنوان جداسازی طیف تبدیل فوریه معکوس سریع یا به صورت ساده‌تر، الگوریتم IFFT نامیده می‌شود.

هدف از این مقاله بررسی عملکرد تکنیک‌های تخمین فرکانس (TOA) و تفاضل زمان ورود (TDOA) برای بدست آوردن تأخیر امواج آسمانی است. با شناخت تأخیر امواج آسمانی در شرایط سخت همچون نسبت سیگنال به نویز پایین یا نسبت بالای امواج آسمانی به امواج زمینی<sup>۱</sup> و همچنین زمانی که پهنای باند پنجره‌ای و تأخیر امواج آسمانی کوچک است، از سیگنال لورن  $C$  در بهترین حالت برای ناوبری استفاده می‌شود.

تفاوت زمانی بین امواج زمینی و مؤلفه‌های اول امواج آسمانی را تأخیر امواج آسمانی می‌گویند که محدوده‌ای بین ۳۵ تا ۵۰ میکرو ثانیه دارد. گیرنده لورن  $C$  موقعیت خود را با استفاده از اندازه‌گیری زمان رسیدن سیگنال امواج زمینی از ایستگاه‌های فرستنده رادیویی که ثابت هستند محاسبه می‌کند. امواج آسمانی و برخی از سیگنال‌های مزاحم، دقت اندازه‌گیری زمان رسیدن سیگنال امواج زمینی را پایین می‌آورند. تکنیک مرسوم برای کاهش تداخل امواج آسمانی، اندازه‌گیری زمان رسیدن سیگنال امواج زمینی در نقطه گذر از صفر است که قبل از نقطه رسیدن نزدیکترین مؤلفه امواج آسمانی می‌باشد. اگر نقطه عبور از صفر زودتر از آن زمانی که در شرایط بدست آمده، انتخاب شود گیرنده سیگنال به نویز و سیگنال به تداخل<sup>۲</sup> غیر ضروری را متحمل می‌شود و اگر دیرتر از آن چیزی که در شرایط بدست آمده، انتخاب شود، گیرنده خطای بیش از حد ناشی از تداخل امواج آسمانی را متحمل می‌شود [۳-۱].

از تکنیک‌های یادشده برای شناخت هجوم اولیه مؤلفه‌های امواج آسمانی استفاده می‌شوند. سپس توسط زمان رسیدن سیگنال امواج زمینی فوراً نقطه عبور از صفر پیشین اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین، این الگوریتم‌ها برای اندازه‌گیری تأخیر امواج آسمانی در هر لحظه به کار می‌روند تا بهترین نقطه عبور از صفر برای نمونه برداری انتخاب گردد [۳-۴].

در ادامه و در بخش ۲، ابتدا تکنیک‌های تخمین فرکانس مبتنی بر تجزیه مقادیر ویژه و FFT بیان می‌شود. در بخش ۳؛ الگوریتم تفاضل زمان ورود TDOA مورد بررسی قرار گرفته و در بخش ۴ یک روش پیشنهادی که ترکیب تفاضل زمان ورود و زمان ورود می‌باشد برای بهبود کارایی و افزایش دقت ارائه گردیده است. در بخش ۵ این الگوریتم‌ها برای سیگنال لورن که شامل موج زمینی و امواج آسمانی است، شبیه‌سازی می‌شوند و این روش‌ها با هم مقایسه و روش مناسب برای مکان‌یابی سیستم‌های لورن پیشنهاد می‌گردد. در

1- Sky to Ground Ratio (SGR)

2- Signal to Interference Ratio (SIR)

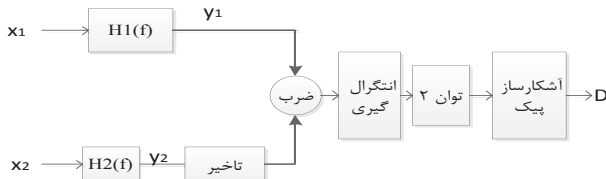
نیست مناسب است. در ادامه بیشتر به این روش پرداخته شده است. چراکه تکنیک رایج‌تر برای تخمین TDOA، تکنیک همبستگی متقابل است.

برای داشتن تخمین دقیق TDOA، به تکنیک‌های تخمین زمان تاخیری که در برابر نویز و تداخل و چند مسیری مقاوم هستند، نیاز داریم [۱۱-۱۲].

### ۳-۱- روش‌های همبستگی متقابل کلی [۱۲-۱۸]

در این روش‌ها بین سیگنال‌های فیلترشده دریافتی در دو ایستگاه، همبستگی متقابل گرفته می‌شود و تفاضل زمان ورود (D) بین دو ایستگاه به وسیله تعیین لحظه وقوع پیک همبستگی بدست می‌آید. این پیش‌فیلترینگ برای تقویت فرکانس‌هایی که در آن‌ها نسبت سیگنال به نویز (SNR) بالاست همچنین برای تضعیف توان نویز قبل از عبور سیگنال از مدار همبستگی لازم است.

$$R_{x_1x_2}(\tau) = AR_s(\tau - D)e^{-j\pi\alpha D} \quad (7)$$



شکل (۱). روش همبستگی متقابل کلی برای تخمین TDOA [۹]

مقدار آرگومان  $\tau$  که رابطه (۷) را بیشینه می‌کند برابر است با مقدار تفاضل زمان ورود یعنی D، لذا رابطه (۷) را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$R_{x_1x_2}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x_1(t)x_2(t-\tau)dt \quad (8)$$

از آنجایی که  $R_{x_1x_2}(\tau)$  را فقط در یک زمان مشاهده محدود می‌توان محاسبه کرد، بنابراین تخمین همبستگی متقابل به این صورت خواهد بود:

$$\hat{R}_{x_1x_2}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x_1(t)x_2(t-\tau)dt \quad (9)$$

که T بازه مشاهده را نشان می‌دهد.

به منظور افزایش دقت محاسبه تاخیر، قبل از انتگرال‌گیری در (۹)، باید از فیلتر استفاده شود. با توجه به شکل (۱)، هر یک از سیگنال‌های  $x_1(t)$  و  $x_2(t)$  توسط فیلترهای  $H_1$  و  $H_2$  فیلتر

سیگنال لورن C یا همان  $x_c(\omega)$  در حوزه زمان به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$x_c(t) = x_g(t) + \sum_{n=1}^N k_n x_g(t - \tau_n) + w(t) \quad (4)$$

با گرفتن تبدیل فوریه از رابطه (۴)، یک توصیف از سیگنال در حوزه فرکانس به صورت زیر به دست می‌آید:

$$X_c(f) = X_g(f) \left[ 1 + \sum_{n=1}^N k_n e^{j2\pi f \tau_n} \right] + W(f) \quad (5)$$

در رابطه (۵)، جداسازی طیفی<sup>۱</sup> با استفاده از طیف استاندارد پالس لورن C انجام شده، سپس با گرفتن معکوس تبدیل فوریه سریع، نتیجه به حوزه زمان برمی‌گردد. این فرآیند به صورت زیر بیان می‌شود:

$$F^{-1} \left[ \frac{X_c(f)}{X_0(f)} \right] = k_g \left[ \delta(t) + \sum_{n=1}^N k_n \delta(t - \tau_n) \right] + F^{-1} \left[ \frac{W(f)}{X_0(f)} \right] \quad (6)$$

که  $X_0(f)$  طیف پالس نرمالایز شده لورن C استاندارد  $X_0(t)$  و  $k_g$  یک ثابت وابسته به دامنه سیگنال امواج زمینی است. در رابطه حوزه زمان (۶)، ضربه‌هایی در زمان‌های ورود مؤلفه‌های امواج زمینی و آسمانی مشاهده می‌شود. بنابراین از این روش می‌توان زمان شروع امواج آسمانی را به دست آورد.

### ۳- الگوریتم‌های تخمین TDOA [۱۰-۱۱]

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.

روش 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 مخصوصاً هنگامی که مشخصات سیگنال ارسال در ابتدا مشخص

## ۴-۱- روش نسبت پیک نیم‌سیکل (HCPR) [۹ و ۱۹]

اگر نقاط عبور از صفر افزایشی در زمان  $t$  میکرو ثانیه بعد از 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 اینکه نسبت پیک دامنه‌ها در این نقاط منفی است، می‌توانند مبنایی برای تشخیص نقطه عبور از صفر باشد. مقادیر  $t$  به دست آمده یا مضربی از  $10\mu s$  و یا نزدیک به آن است که به نزدیک‌ترین عدد مضرب  $10\mu s$  گرد می‌گردد. نسبت پیک نیم‌سیکل در زمان  $t$  در یک پالس لورن به صورت زیر تعریف می‌گردد.

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

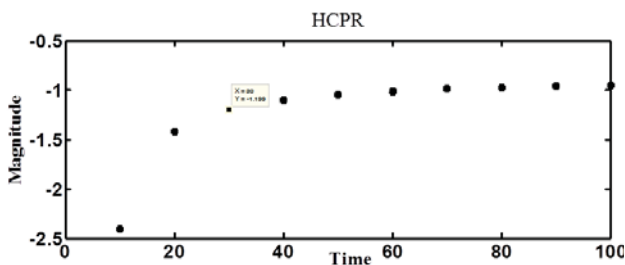
مقدار  $t$  با تغییر متغیر زیر محاسبه می‌شود:

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

که در آن:

$$A = (\sqrt{h}) e^{\frac{5}{65}}$$

در شکل (۲) نسبت پیک نیم‌سیکل ( $h$ ) برای یک پالس موج آسمانی لورن در نقاط عبور از صفر افزایشی محاسبه شده است.



شکل (۲). نسبت پیک نیم‌سیکل، برای یک پالس موج آسمانی لورن در نقاط عبور از صفر افزایشی

نمونه‌برداری با سرعت  $10^6$  نمونه بر ثانیه انجام شده است، بنابراین تعداد نمونه‌ها در هر میکروثانیه ۱ است. با توجه به این نکته نسبت پیک سیگنال برای سیگنال اصلی که قبلاً فیلتر شده، با تقریب در فاصله زمانی  $t-2\mu s$  تا  $t+2\mu s$  محاسبه شده و در شکل (۳) نشان داده شده است.

می‌شود؛ سپس همبستگی بین آنها محاسبه و به توان ۲ رسانده می‌شود. این عملیات برای بازه‌ای از شیفت‌های زمانی پارامتر  $\tau$  انجام می‌شود تا پیک همبستگی پیدا شود. پارامتر زمانی که باعث به وجود آمدن پیک همبستگی متقابل می‌شود معادل تخمین تفاضل زمان ورود ( $\hat{D}$ ) است.

اگر بخواهیم یک تخمین بایاس‌نشده TDOA را داشته باشیم، فیلترها باید مشخصات فرکانسی و فازی یکسانی داشته باشند و معمولاً باید فیلترهای مشابهی انتخاب شوند [۱۴ و ۱۷]. زمانی که فیلترهای  $H_1(f) = H_2(f) = 1$  باشند، تخمین  $\hat{G}$  به سادگی برابر لحظه وقوع پیک در همبستگی متقابل است. این روش، به پردازش همبستگی متقابل مشهور است. پردازنده‌های دیگر عبارتند از: پردازنده پاسخ ضربه راس<sup>۱</sup> [۱۶]، تبدیل همدوس نرم<sup>۲</sup> (SCOT)، فیلتر اکارت<sup>۳</sup> [۱۷ و ۱۴] و پردازنده هانون تامسون<sup>۴</sup> یا تخمین زننده حداکثر شباهت (ML) [۱۹].

## ۴- روش پیشنهادی (ترکیب تفاضل زمان ورود و زمان ورود)

در این روش پیشنهادی، از ترکیب الگوریتم‌های تخمین فرکانس و الگوریتم‌های تخمین اختلاف زمان ورود، برای افزایش دقت و بهبود کارایی استفاده می‌شود. الگوریتم پیشنهادی به این صورت است که ابتدا با الگوریتم‌های تخمین فرکانس (TOA)، زمان ورود امواج آسمانی تخمین زده می‌شود و سپس با استفاده از الگوریتم TDOA این کار تکرار می‌شود. در مرحله بعد با استفاده از زمان‌های به دست آمده از هر روش، نقاط عبور از صفر افزایشی به دست می‌آید، با توجه به این که فرکانس امواج لورن  $10^6$  کیلو هرتز می‌باشد، می‌بایست این زمان‌ها مضربی از  $10$  باشند. سپس مقدار HCPR برای نقاط به دست آمده محاسبه می‌گردد و این مقدار به دست آمده در هر روش را با مقدار واقعی آن مقایسه می‌کنیم و در هر روشی که به مقدار واقعی نزدیک‌تر باشد، دقیق‌تر بوده و زمان به دست آمده از آن روش را به عنوان زمان ورود سیگنال در نظر می‌گیریم و به مضرب  $10$  گرد می‌گردد. در ادامه دو روش برای محاسبه نقاط عبور از صفر افزایشی ارائه می‌شود.

5- Half Cycle Peak Ratio

1- Roth Impulse Response

2- Smoothed Coherence Transform

3- Eckart

4- Hannon-Thomson or Maximum Likelihood

می‌کند، فیلتر می‌شود. بعد از فیلترینگ در جهت مستقیم، ترتیب فیلتر شده معکوس می‌شود و به عقب رانده می‌شود و دوباره از میان فیلتر عبور می‌کند. بخش دوم، بلوک تقسیم طیف است؛ در این بخش، از پالس لورن  $C$ ،  $x_c(t)$ ، 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  $H(w)$  به وسیله تکنیک استاندارد پنجره هنینگ<sup>۲</sup>، برای رسیدن به حذف پارازیت بزرگ، پنجره‌دار خواهد شد. بخش آخر، تخمین تأخیر امواج آسمانی است. تأخیر امواج آسمانی  $\tau_2$  و  $\tau_3$  با استفاده از تکنیک استاندارد IFFT و تکنیک‌های فرکانسی پیزارنکو، Music و اسپریت تخمین زده می‌شود.

گین امواج آسمانی  $\beta$  با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\beta = \sqrt{\frac{10 \frac{SGR}{10} \sum_n |x_g(t)|^2}{\sum_n |x_{sk}(t)|^2}} \quad (12)$$

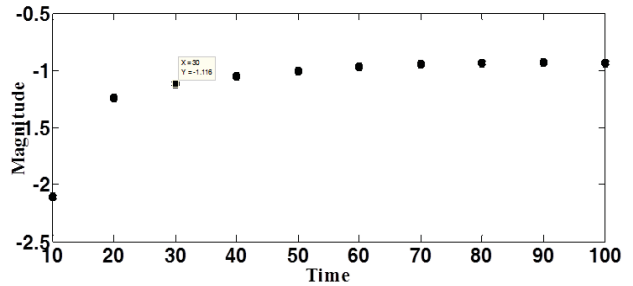
در شکل (۵)، سیگنال دریافتی  $x_s(t)$  که مجموع یک سیگنال زمینی با تأخیر  $\tau_1 = 20 \mu s$  و دو سیگنال آسمانی با تأخیرهای  $\tau_2 = 80 \mu s$  و  $\tau_3 = 150 \mu s$  و با حضور نویز  $SNR = 8 \text{ dB}$  است، مشاهده می‌شود.

در شبیه‌سازی‌ها، مقدار نسبت امواج آسمانی به زمینی برابر با ۱۲ dB در نظر گرفته شده است. معمولاً فیلتر کردن باعث شیفت سیگنال ورودی می‌شود، که این شیفت در فیلتر FIR برابر با معادله زیر است:

$$shift = \frac{\text{مرتبه فیلتر}}{2F_s} \quad (13)$$

بنابراین، این شیفت باید در تخمین تأخیرها در شبیه‌سازی لحاظ شود.

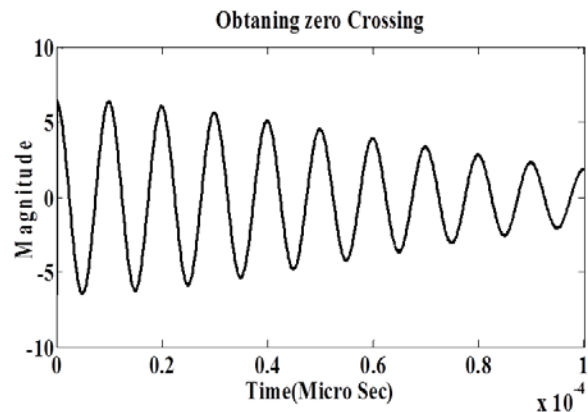
در شکل (۶- الف) استفاده از الگوریتم IFFT برای تخمین تأخیر با حضور نویز نشان داده شده است. در این شبیه‌سازی، سیگنال زمینی با تأخیر  $\tau_1 = 20 \mu s$  و سیگنال آسمانی با تأخیرهای  $\tau_2 = 80 \mu s$  و  $\tau_3 = 150 \mu s$  به گیرنده می‌رسد. و فرض بر آن است که سیگنال با نویز جمع‌شونده ۸ dB دریافت می‌شود. همان‌طور که در این شکل می‌بینیم با روش گفته‌شده در بالا نمی‌توان تأخیرها را به دست آورد. برای به دست آوردن تأخیرها در حضور نویز باید از فیلتر استفاده کرد. بنابراین باید ابتدا با استفاده از FFT گرفتن از سیگنال دریافتی،



شکل (۳). نسبت پیک نیم‌سیکل، برای یک پالس موج آسمانی لورن فیلترشده، در نقاط عبور از صفر افزایشی

#### ۲-۴- روش تأخیر و جمع<sup>۱</sup> [۹ و ۲۰]

در این روش، برای تشخیص نقاط عبور از صفر بازه‌ای به طول ۲.۵ میکروثانیه حول نقاط عبور از صفر در نظر می‌گیرند. بنابراین سیگنال جدیدی ساخته می‌شود. همبستگی بین سیگنال جدید و امواج آسمانی لورن محاسبه می‌شود. شکل (۴)، نتیجه محاسبه این همبستگی را نشان می‌دهد.



شکل (۴). نتیجه محاسبه این همبستگی در بازه‌ای به طول ۲.۵ میکرو ثانیه در نقاط عبور از صفر یک موج آسمانی لورن

همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود، پیک مقادیر همبستگی در نقاط عبور از صفر اتفاق می‌افتد. با پرش بر روی این مقادیر پیشینه می‌توان نقاط عبور از صفر را دقیقاً شناسایی نمود.

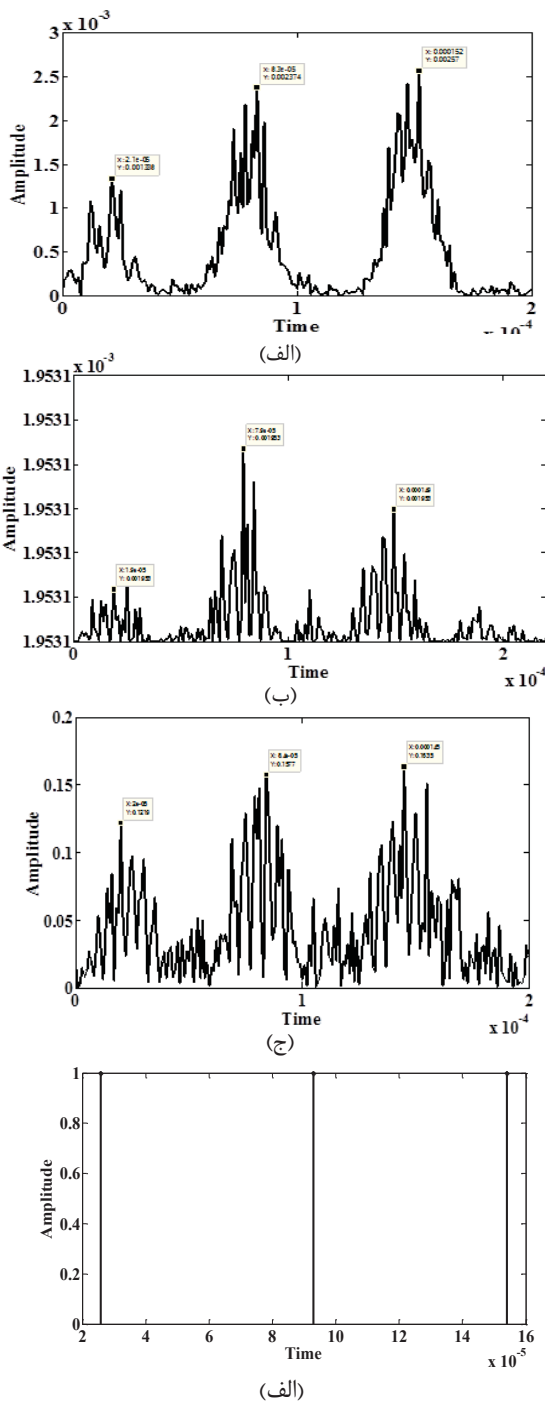
#### ۱-۵- شبیه‌سازی الگوریتم‌های تخمین فرکانس

مراحل انجام شبیه‌سازی شامل سه بخش است. در بخش اول پالس لورن به اضافه نویز گوسی سفید تولید می‌شود. در این بخش محتویات سیگنال  $x_g(t)$  با استفاده از فیلتر دیجیتال فاز صفر<sup>۲</sup> که داده‌های ورودی را به هر دو جهت (رو به جلو و عقب پردازش)

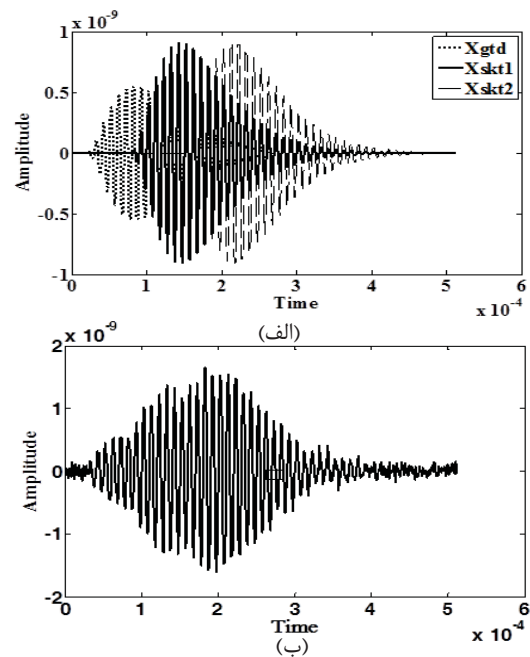
3- Haning window

1- Delay – and - add  
2- Zero-phase

می‌آید. سپس تأخیرها توسط الگوریتم‌های تخمین فرکانس به‌دست می‌آیند. در شکل (۷) تخمین تأخیرهای به‌ترتیب  $20 \mu\text{s}$ ،  $80 \mu\text{s}$  و  $150 \mu\text{s}$  با استفاده از فیلتر کردن سیگنال دریافتی در حضور نویز  $8 \text{ dB}$  و استفاده از الگوریتم‌های تخمین فرکانس نشان داده شده است.

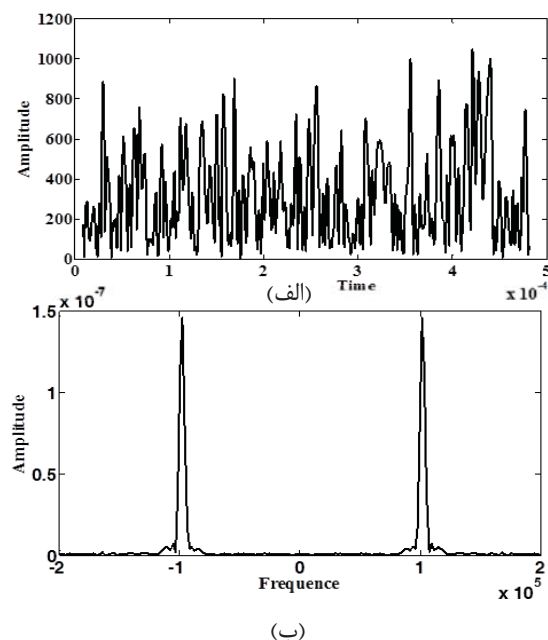


شکل ۷. تخمین تأخیرها با حضور نویز و استفاده از فیلتر برای تأخیرهای  $20 \mu\text{s}$ ،  $80 \mu\text{s}$  و  $150 \mu\text{s}$  با الگوریتم: الف) اسپریت؛ ب) Music؛ ج) IFFT؛ د) بیزارنکو.



شکل ۵. الف) سیگنال زمینی و آسمانی لورن C با تأخیرهای  $20 \mu\text{s}$ ،  $80 \mu\text{s}$  و  $150 \mu\text{s}$ ؛ ب) سیگنال  $x_s(t)$  با نویز در  $\text{SNR} = 8 \text{ dB}$ .

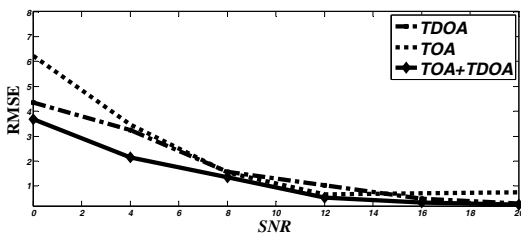
پهنای باند را به‌دست آورده و سپس سیگنال دریافتی را فیلتر کرد. همانطور که در شکل (۶-ب) مشاهده می‌شود، پهنای باند سیگنال برای فیلتر را می‌توان حدود  $40 \text{ kHz}$  در نظر گرفت.



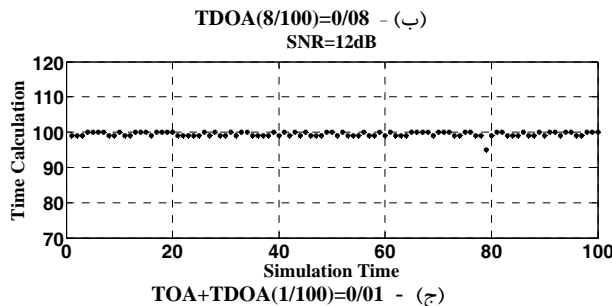
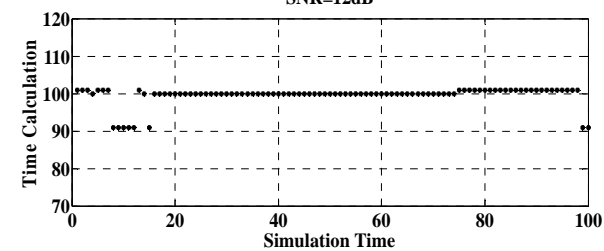
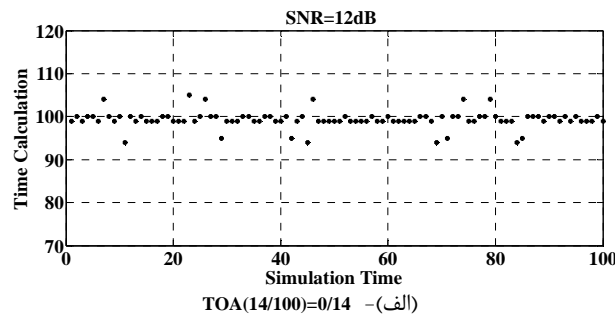
شکل ۶. الف) به‌دست آوردن تأخیرها با روش IFFT با حضور نویز؛ ب) طیف سیگنال دریافتی و به‌دست آوردن پهنای باند فیلتر

بنابراین در روش عملی برای به‌دست آوردن تأخیرها، ابتدا سیگنال دریافتی فیلتر شده، سپس از این سیگنال و سیگنال لورن C استاندارد، FFT گرفته و آن دو را بر هم تقسیم کرده و  $\text{HW}$  به‌دست

تولید می‌شوند. در مرحله بعد سیگنال آغشته به نویز AWGN با SNR ۱۲ dB می‌گردد. سپس در بلوک بعدی با استفاده از یک فیلتر FIR سیگنال فیلتر می‌شود. در مرحله آخر با استفاده از سه روش TOA, TDOA و روش ترکیبی، تأخیر را تخمین می‌زنیم. این عمل ۱۰۰ بار تکرار شده و نتایج آن در نمودارهای شکل (۱۰) آورده شده است. به طور متوسط میزان خطاهای بزرگتر از ۵۰۰۰ نانوثانیه برای روش TOA (۱۴/۱۰۰=۰/۱۴)، برای روش TDOA (۸/۱۰۰=۰/۰۸) و برای روش ترکیبی، این عدد به (۱/۱۰۰=۰/۰۱) کاهش یافته است. با توجه به نتایج به دست آمده میزان خطا در الگوریتم ترکیبی نسبت به روش TOA، ۸٪ و نسبت به روش TDOA، ۱۲/۵٪ می‌باشد.



شکل (۹). مقایسه RMSE در مقابل افزایش سیگنال به نویز برای روش TOA, TDOA, TOA+TDOA



شکل ۱۰. مقایسه اختلاف زمانی بدست آمده برای ۱۰۰ بار تکرار برای روش‌های الف) TOA ب) TDOA ج) TOA+TDOA

## ۵-۲- شبیه‌سازی الگوریتم TDOA

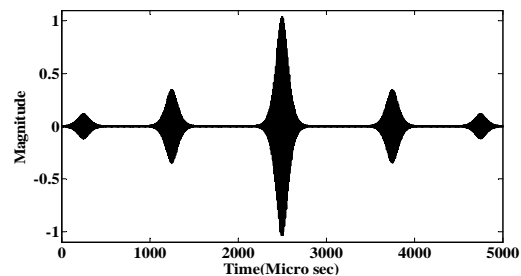
برای الگوریتم تخمین TDOA با استفاده از رابطه همبستگی بین سیگنال دریافتی (شامل سیگنال ارسالی از فرستنده اصلی که دارای ۹ پالس (۸ پالس با فاصله  $1000 \mu\text{sec}$  و آخری با فاصله  $2000 \mu\text{sec}$ ) و سیگنال ارسالی از ایستگاه‌های ثانویه شامل ۸ پالس که این پالس‌ها با فاصله زمانی  $1000 \mu\text{sec}$  از یکدیگر قرار دارند می‌باشد) و سیگنال‌های  $m_a$  و  $s_a$  نقطه شروع اولین پالس امواج مشخص می‌شود. در این مرحله برای کاهش حجم محاسبات رابطه همبستگی برای نمونه‌هایی که دامنه آنها کمتر از  $0/90$  است، رابطه همبستگی اعمال نمی‌شود. هم‌چنین برای کاهش حجم محاسبات رابطه همبستگی برای  $120 \mu\text{sec}$  اول پالس لورن محاسبه می‌شود. ابتدا سیگنال‌های  $m_a$  و  $s_a$  به صورت زیر ساخته می‌شوند:

$$m_a = [+1, +1, -1, -1, +1, -1, +1, -1, +1] * P(t)$$

$$s_a = [+1, +1, +1, +1, +1, -1, -1, +1] * P(t)$$

$p(t)$  پالس موج آسمانی لورن ایده‌آل است. سپس همبستگی سیگنال‌های  $m_a$  و  $s_a$  با سیگنال دریافتی، در نقطه شروع سیگنال محاسبه می‌شود.

شکل (۸) نتیجه همبستگی سیگنال ورودی با سیگنال اصلی A را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بیشینه مقدار همبستگی سیگنال ورودی با سیگنال اصلی A نزدیک به مقدار ۱ است. در این سیگنال مقدار همبستگی در نقطه  $X=2499$  به بیشینه مقدار خود می‌رسد که این نقطه، نقطه شروع سیگنال است.



شکل (۸). نتیجه همبستگی سیگنال اصلی A با قوی ترین سیگنال موجود دریافتی

در شکل (۹) نمودار RMSE در مقابل افزایش سیگنال به نویز برای روش‌های TOA, TDOA, TOA+TDOA و  $N_{BS}=3$  نشان داده شده است. در این شکل، RMSE برای سیگنال به نویزهای ۰ تا  $20 \text{ dB}$  نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود با افزایش سیگنال به نویز خطای RMSE کاهش پیدا می‌کند و روش TOA+TDOA بهترین عملکرد را دارد.

شکل (۱۰) مقادیر اختلاف زمانی تخمین زده شده با استفاده از سه روش TOA, TDOA و روش ترکیبی برای SNR ۱۲ dB (در عمل SNR امواج آسمانی در این محدوده قرار دارد) را نشان می‌دهد. ابتدا ۲ موج آسمانی لورن که دارای اختلاف زمانی  $100 \mu\text{S}$  هستند



## ۶- نتیجه‌گیری

Degree of Master of Science in Electrical Engineering, Department of Telecommunications and Signal Processing, Blekinge Institute of Technology, Sweden, 2003.

- [6] A. Mohammed and T. Hult, "Detection and minimization of ionospheric interference in loran C receivers," 11th International Conference on Ionospheric radio Systems and Techniques (IRST 2009), pp. 1-6, 2009.
- [7] A. Mohammed, F. Le Roux and D. Last, "Eigen-decomposition Techniques for Sky wave Interference Detection in loran C receivers", International Loran association, meeting 2003.
- [8] A. Mohammed, H. Chemnitzer, and D. Last, "Full Performance Analysis of IFFT Spectral-Division Technique for Sky wave Identification in loran C Receivers," International Loran association, meeting, 2002.
- [9] A. J. Fsher, "The Loran-c Cycle Identification problem," <http://www.cs.york.ac.uk ftpdir/reports/YCS-99-318.pdf>, 2011.
- [10] Y. Bin, "Different Sensor Placement Strat-Egies For Tdoa Based Localization," IEEE Conference, ICASSP, 2010.
- [11] W. A. Gardner, "Cyclostationary in Communications and Signal Processing," IEEE Press, 1994.
- [12] 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.
- [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] G. Shen, R. Zetik, and R. S. Thoma, "Performance Comparison of Toa and Tdoa Based Location Estimation Algorithms in Lose nvironment," IEEE Proceedings of The 5th Workshop on Positioning, Navigation and Communication, 2008.

در این مقاله، الگوریتم‌های تخمین فرکانس، به‌منظور تخمین تأخیر امواج آسمانی، به‌عنوان یکی از منابع خطا در سیستم‌های لورن C، معرفی و تحلیل شد. دیده شد که در حضور نویز باید حتماً سیگنال دریافتی از یک فیلتر عبور کند. الگوریتم‌های پیزارنکو، Music، اسپریت و IFFT بررسی شده و پس از شبیه‌سازی الگوریتم‌های تخمین فرکانس و تحلیل نتایج مشخص گردید که الگوریتم Music عملکرد بسیار بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌های تخمین فرکانس در شرایط SNR بالا دارد. برای الگوریتم تخمین TDOA با استفاده از رابطه همبستگی و یافتن نقطه پیک، نقطه شروع اولین پالس امواج آسمانی مشخص شد. نمودار خطای RMSE برای سیگنال به نویزهای ۰ تا ۲۰ dB نشان داده شد و ملاحظه گردید، با افزایش سیگنال به نویز، خطای RMSE کاهش پیدا می‌کند و روش ترکیبی (ترکیب تفاضل زمان ورود و زمان ورود) بهترین عملکرد را دارد. با توجه به نتایج بدست‌آمده میزان خطا در روش پیشنهادی نسبت به روش TOA، ۸٪ و نسبت به روش TDOA، ۱۲٫۵٪ می‌باشد. بنابراین برای تخمین تأخیر امواج آسمانی سیستم‌های تعیین موقعیت لورن، به‌منظور داشتن حداقل خطا بهتر است روش ترکیبی (ترکیب تفاضل زمان ورود و زمان ورود) استفاده گردد.

## ۷. مراجع

- [1] M.S.Grewal, L. R. Weill and A. P. Andrews, "Global positioning systems - inertial navigation and integration," Second edition, Chapter 1, 2007.
- [2] Mohammed, "Estimation of loran C Ionospheric signal parameters via ESPRIT algorithm," The Second European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), pp. 1-5, 2007.
- [3] Mohammed, F. Le Roux, and D. Last, "Eigen-decomposition Techniques for Sky wave Interference Detection in loran C receivers," International Loran association, meeting, 2003.
- [4] A. Mohammed and D. Last, "loran C sky wave delay detection using ARMA algorithm," Electronics letters, vol. 34, no. 17, pp. 1654-1655, August 1998.
- [5] L. L. R. Fernand, "Estimation of loran C Sky-waves Using Frequency Estimation Techniques,"



- [15] G. C. Carter, "Coherence and Time Delay Estimation," Proc. IEEE, vol. 75, pp. 236-255, Feb. 1987.
- [16] W. R. Hahn, "Optimum Signal Processing for Passive Sonar Range and Bearing Estimation" ,Journal of Acoustical Society of America, vol. 58, pp. 201-207, July 1975.
- [17] 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.
- [18] A. Gupta , G. Chandra Tripathi, "Design and Analysis of Low Pass FIR & IIR Filter and Find Optimum Result Using Neural Network," Global Journal of Researches in Engineering, vol. 10, Issue 7 (Ver1.0), Dec. 2010.
- [19] P. H. Kamp, "A Cheap SDR Loran-C frequency receiver," 2009.