

## ارائه یک روش ترکیبی برای مقابله با جمینگ موج پیوسته در گیرنده‌های GPS

محمدجواد رضائی<sup>۱</sup>، سید محمدرضا موسوی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت: ۹۴/۰۸/۲۴، پذیرش: ۹۵/۰۲/۱۴)

## چکیده

مقابله با جمینگ از مهم‌ترین مباحث مطرح در حوزه GPS می‌باشد. از آن‌جا که جمینگ موج پیوسته (CW)، متداول‌ترین نوع جمینگ در این حوزه محسوب می‌شود، در این مقاله یک روش ترکیبی برای حذف اثر این نوع جمینگ ارائه شده است. روش پیشنهادی یک روش نرم‌افزاری قابل پیاده‌سازی در پردازنده دیجیتال گیرنده GPS می‌باشد که از فیلتر شکاف با پاسخ ضربه نامحدود و نیز تبدیل موجک برای زدودن اثر جمینگ بهره می‌گیرد. از ویژگی‌های روش ارائه‌شده، می‌توان به دقت بالای مکان‌یابی و نیز حجم محاسباتی کم (در نتیجه سرعت پردازش بالا) اشاره کرد. نتایج شبیه‌سازی روی داده‌های واقعی جمع‌آوری شده از یک گیرنده تک فرکانسه GPS، نشان می‌دهد که در حضور جمینگ CW، دقت مکان‌یابی گیرنده مجهز به سامانه پیشنهادی، مقدار ۸۲/۵ درصد نسبت به گیرنده مجهز به سامانه استاندارد، پیشرفت داشته است.

واژه‌های کلیدی: تبدیل موجک، جمینگ، فیلتر شکاف، گیرنده GPS.

## ۱- مقدمه

و استفاده از آن‌ها متداول نمی‌باشد [۸]. روش‌های مبتنی بر پردازش سیگنال، به عنوان پرکاربردترین روش‌ها به دو دسته روش‌های پس از همبسته‌گیری<sup>۳</sup> و پیش از همبسته‌گیری<sup>۴</sup> تقسیم می‌شوند. روش‌های پس از همبسته‌گیری به روش‌هایی اطلاق می‌شود که در طراحی حلقه‌های ردیابی<sup>۵</sup> گیرنده به‌کار گرفته می‌شوند. این روش‌ها صرفاً برای مقابله با جمینگ‌های با توان پایین کاربرد دارند [۹]. اما متداول‌ترین روش‌های مقابله با جمینگ در گیرنده‌های GPS، روش‌های پیش از همبسته‌گیری می‌باشند که به پردازش سیگنال IF دیجیتال در خروجی مبدل آنالوگ به دیجیتال گیرنده (ADC) می‌پردازند [۹].

روش‌های پیش از همبسته‌گیری عمدتاً از فیلترینگ زمان-فرکانس [۱۵-۱۰] و یا از فیلترینگ تطبیقی [۲۲-۱۶] برای حذف جمینگ استفاده می‌کنند. در روش‌های مبتنی بر فیلترینگ زمان-فرکانس، سیگنال آلوده به جمینگ، به‌طور هم‌زمان در دو حوزه زمان و فرکانس مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این روش‌ها که قابلیت شناسایی و حذف انواع جمینگ باریک باند را دارند، عموماً از ابزارهایی نظیر تبدیل فوریه کوتاه زمان

سامانه موقعیت یاب جهانی (GPS)<sup>۱</sup> به دلیل بهره‌گیری از مخابرات طیف گسترده دارای یک مقاومت ذاتی در برابر جمینگ می‌باشد. اما وقتی که توان جمینگ از بهره پردازشی GPS، فراتر رود کارایی این سامانه طیف گسترده در مقابله با جمینگ، دچار افت شدیدی می‌شود. در چنین شرایطی به-کارگیری یک روش مقابله با جمینگ در گیرنده‌های GPS، ضروری می‌باشد [۱-۳].

روش‌های گوناگونی برای مقابله با جمینگ وجود دارند که در سطوح مختلف گیرنده، به‌کار گرفته می‌شوند: روش‌های سطح آنتن به گروهی از روش‌ها اطلاق می‌شود که از آنتن‌های آرایه‌ای و پردازش فضایی برای مقابله با جمینگ بهره می‌گیرند [۷-۴]. این روش‌ها برای مقابله با انواع جمینگ مناسب می‌باشند. تحمیل سخت‌افزار اضافی به گیرنده و نیز حجم محاسباتی بالا، کاربرد این روش‌ها را محدود می‌کند [۷]. روش‌های سطح مدار به روش‌هایی گفته می‌شود که در طراحی تقویت‌کننده با بهره خودکار (AGC)<sup>۲</sup> گیرنده، در نظر گرفته می‌شوند. این روش‌ها به لحاظ وسعت کاربرد و نیز اثربخشی، دارای محدودیت زیادی بوده

3 -Post-Correlation

4 -Pre-Correlation

5 -Tracking

6 -Analog to Digital Converter

\* رایانامه نویسنده مسئول: M\_Mosavi@iust.ac.ir

1 -Global Positioning System

2 -Automatic Gain Control

بر دقت گیرنده تاثیر می‌گذارند) و در نتیجه افزایش سرعت محاسبات را فراهم می‌آورد.

ساختار مقاله پیش‌رو به این صورت است که در ادامه و در بخش دوم، ساختار سیگنال GPS و نیز جمینگ CW مورد بررسی قرار می‌گیرند. در بخش‌های سوم و چهارم به ترتیب، مفاهیم مرتبط با فیلتر شکاف و DWT شرح داده می‌شوند. بخش پنجم به معرفی روش پیشنهادی می‌پردازد. در بخش ششم، نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی، روی داده‌های واقعی مستخرج از یک گیرنده GPS ارائه می‌شوند. در بخش پایانی، نتیجه‌گیری بیان خواهد شد.

## ۲- ساختار سیگنال GPS و جمینگ

در یک محیط آلوده به جمینگ، سیگنال دریافت‌شده توسط گیرنده GPS از سه جزء اساسی تشکیل می‌شود: سیگنال GPS، نویز و سیگنال جمینگ. سیگنال دریافت‌شده پس از تقویت، فیلتر شدن، کاهش فرکانس و تنظیم دامنه، به کمک یک ADC به فرم دیجیتال تبدیل می‌شود:

$$r(k) = s(k) + j(k) + w(k) \quad (1)$$

که در این رابطه،  $r(k)$  نسخه دیجیتال سیگنال دریافتی بوده،  $s(k)$ ،  $j(k)$  و  $w(k)$  به ترتیب نسخه دیجیتال سیگنال GPS، جمینگ و نویز می‌باشند. توان نویز برابر  $\sigma_w^2$  در نظر گرفته می‌شود. سیگنال GPS را می‌توان طبق رابطه (۲) بیان نمود:

$$s(k) = \sqrt{2P_s} D(k) CA(k) \cos(2\pi f_{IF} k + \theta) \quad (2)$$

در رابطه (۲)،  $f_{IF}$ ،  $P_s$  و  $\theta$  به ترتیب توان، فرکانس و فاز سیگنال IF دیجیتال می‌باشند.  $CA(k)$  مبین کد C/A با دوره تناوب 1 msec و  $D(k)$  مبین پیام ناوبری با دوره تناوب 20 msec است.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، جمینگ CW یکی از پرکاربردترین اقسام جمینگ است که علیه گیرنده‌های GPS استفاده می‌شود. دو شکل متداول جمینگ CW، جمینگ موج پیوسته تک‌تون ( $SCWI^s$ ) و جمینگ موج پیوسته چندتون ( $MCWI^s$ ) است:

$$j_{SCWI}(k) = \sqrt{2P_j} \cos(2\pi f_j k + \theta_j) \quad (3)$$

$$j_{MCWI}(k) = \sum_{i=1}^n \sqrt{2P_{j_i}} \cos(2\pi f_{j_i} k + \theta_{j_i}) \quad (4)$$

(STFT)<sup>۱</sup> [۱۱-۱۰]، بانک فیلترها<sup>۲</sup> [۱۲]، تبدیل موجک<sup>۳</sup> [۹ و ۱۳] و پردازش زیرفضا [۱۴ و ۱۵] استفاده می‌کنند. در روش‌های مبتنی بر فیلترینگ تطبیقی، یک تخمین‌گر، سیگنال جمینگ را در حوزه زمان، تخمین زده و از سیگنال دریافتی حذف می‌کند [۱۸-۱۶] و یا یک فیلتر شکاف<sup>۴</sup> به حذف سیگنال جمینگ، در حوزه فرکانس می‌پردازد [۲۲-۱۸]. این روش‌ها نیز قابلیت حذف جمینگ باریک باند را دارند و به دلیل سادگی، بار محاسباتی اندک و قابلیت پیاده‌سازی روی پردازنده‌های ارزان‌قیمت، مورد توجه می‌باشند. مشکل اساسی این روش‌ها، افت کارایی آن‌ها در موقعیت‌هایی است که جمینگ، از پیش شناسایی نشده باشد. به عبارت دیگر اگر جمینگ ساختار غیرقابل پیش‌بینی داشته باشد، این روش‌ها کارایی مناسبی نخواهند داشت [۱۹].

متداول‌ترین ابزار برای مقابله با جمینگ موج پیوسته (CW)<sup>۵</sup>، فیلترهای شکاف می‌باشند [۲۰-۱۹]. اما به دلیل محدودیت‌های محاسباتی پردازنده دیجیتال گیرنده GPS، عرض این فیلترها نمی‌تواند بی‌نهایت کوچک در نظر گرفته شود. لذا این فیلترها به همراه حذف جمینگ، همیشه بخش‌هایی از سیگنال GPS را نیز حذف می‌کنند (پدیده نویز خودی<sup>۶</sup>). این پدیده موجب کاهش کیفیت سیگنال بازبازی شده می‌شود و نهایتاً دقت مکان‌یابی گیرنده را کاهش می‌دهد.

در این مقاله یک روش ترکیبی پیش‌پس از همبسته‌گیری برای مقابله با جمینگ ارائه شده است که با استفاده از یک فیلتر با پاسخ ضربه نامحدود (IIR)<sup>۷</sup> در بخش پیش از همبسته‌گیری، سعی در کاهش اثر نویز خودی فیلترینگ شکاف داشته و با استخدام یک واحد محاسباتی مبتنی بر تبدیل موجک گسسته (DWT)<sup>۸</sup> در بخش پس از همبسته‌گیری، به مقابله با کاهش دقت گیرنده (در اثر وجود جمینگ و نیز در اثر پدیده نویز خودی فیلتر شکاف) می‌پردازد. در این مقاله هم‌چنین بهترین موجک و مناسب‌ترین سطح پردازش برای بخش پس از همبستگی محاسبه شده است. ساختار پیشنهادی، هم‌چنین امکان کاهش بار محاسباتی سامانه ضدجمینگ در اثر خاموش کردن بخش پیش از همبستگی‌گیری (در مواجهه با جمینگ‌های کم توان که صرفاً

1 -Short-Time Fourier Transform

2 -Filter Banks

3 -Wavelet Transform

4 -Notch Filter

5 -Continuous Wave

6 -Self-Noise

7 -Infinite Impulse Response

8 -Discrete Wavelet Transform

9- Single-Tone Continuous Wave Interference

10- Multi-Tone Continuous Wave Interference

دارد:

$$H(z) = \frac{1+\alpha}{2} \frac{1-2\beta z^{-1}+z^{-2}}{1-\beta(1+\alpha)z^{-1}+\alpha z^{-2}} \quad (5)$$

در این رابطه، اگر  $\alpha$  و  $\beta$  به گونه ای انتخاب شوند که قدرمطلق مقادیر آنها کوچکتر از ۱ باشد، مشکل ناپایداری فیلتر IIR حل خواهد شد. پارامترهای  $\alpha$  و  $\beta$  به ترتیب تعیین کننده پهنای باند 3-dB فیلتر شکاف (BW) و فرکانس شکاف ( $\omega_N$ ) می باشند:

$$\alpha = \frac{1-\tan(BW/2)}{1+\tan(BW/2)} \quad (6)$$

$$\beta = \cos(\omega_N); \omega_N \in [0, \pi] \quad (7)$$

البته پارامترهای عمق و عرض شکاف فیلتر طراحی شده در [۲۱] در شرایط مختلف جمینگ، بازتنظیم می شوند که این امر موجب افزایش پیچیدگی محاسباتی بخش مقابله با جمینگ مرجع مذکور شده است.

#### ۴- تبدیل موجک گسسته

یکی از ابزارهای متداول برای حذف نویز، تبدیل موجک می باشد. این تبدیل که بر اساس تجزیه سیگنال به اجزای اصلی به کمک یک سری توابع پایه محلی بنا نهاده شده است، امکان بررسی سیگنال در دو حوزه زمان و فرکانس (به صورت همزمان) را می دهد. این توابع محلی از انتقال و مقیاس دهی یک تابع موجک مادر به وجود می آیند. از این رو سیگنال اولیه می تواند به صورت ترکیب خطی از موجک های محلی، در حوزه های زمان و فرکانس بیان شود. در DWT، موجک مادر به صورت رابطه (۸) تعریف می شود:

$$\psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{s_0}} \psi\left(\frac{t-k\tau_0 s_0^j}{s_0^j}\right) \quad (8)$$

که در این رابطه،  $\tau_0$  و  $s_0$  به ترتیب مضارب صحیح مقیاس پایه و انتقال پایه هستند. توابع موجک دارای طیف فرکانسی میان گذر می باشند. بنابراین، در عمل، پوشش کل بازه فرکانسی تا فرکانس صفر، غیرممکن است. برای حل این مشکل توابع مقیاس دهی  $\varphi(t)$  که مانند فیلتر پایین گذر می باشند، در کنار توابع موجک استفاده می شوند.

$$\psi(2^j t) = \sum_k g_{j+1}(k) \varphi(2^{j+1} t - k) \quad (9)$$

$$\varphi(2^j t) = \sum_k h_{j+1}(k) \varphi(2^{j+1} t - k) \quad (10)$$

که در این روابط، ضرایب  $g(k)$  و  $h(k)$  به ترتیب تشکیل یک فیلتر بالاگذر به نام فیلتر موجک و یک فیلتر پایین گذر به نام فیلتر مقیاس دهی می دهند. نحوه تجزیه سیگنال در DWT، به

که در این روابط،  $f_j$ ،  $P_j$  و  $\theta_j$  به ترتیب توان، فرکانس و فاز جمینگ می باشد. اندیس  $i$  بیان گر شماره جمینگ (در نوع چندتون) است. مزیت عمده جمینگ CW این است که توان خروجی جمرها در این حالت می تواند در یک طیف باریک، متمرکز شود. بنابراین جمرهای CW نسبت به جمرهای پهن باند، باریک باند و یا جاروبی با توان خروجی یکسان، قابلیت ایجاد اختلال در فواصل دورتر را دارند؛ یا برای یک فاصله مشخص، یک جمر CW می تواند کوچکتر و سبکتر از انواع دیگر جمر باشد.

جمینگ CW چندتون، می تواند شامل تعدادی تون با توان و فواصل فرکانسی یکسان و یا غیریکسان باشد. باید توجه داشت که لزوماً افزایش تعداد تون های جمینگ چندتون، منجر به افزایش کارایی جمینگ نخواهد شد؛ چراکه در این حالت، توان جمر بین تون های مختلف تقسیم می شود. به عبارت دیگر افزایش بی رویه تعداد تون ها می تواند توان هر تون را به نحوی کاهش دهد که دیگر اثر تخریبی لازم روی گیرنده را نداشته باشد.

#### ۳- فیلتر شکاف

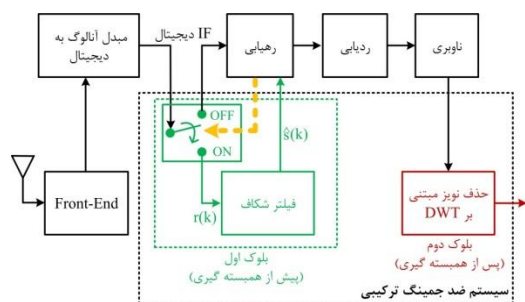
متداول ترین ابزار مقابله با جمینگ CW فیلتر شکاف می باشد. فیلترهای شکاف با پاسخ ضربه محدود (FIR) به سادگی قابل طراحی و پیاده سازی روی پردازنده های دیجیتال هستند، اما عرض زیاد این فیلترها موجب می شود بخش های زیادی از سیگنال GPS به همراه حذف جمینگ، از بین برود [۱۹]. در واقع نویز خودی زیاد این فیلترها، مانع به کارگیری آنها در کاربردهای ضد جمینگ GPS می شود. اما فیلترهای شکاف IIR می توانند به گونه ای طراحی شوند که باند بسیار باریکی را تحت تاثیر قرار دهند و بدین ترتیب بخش های بسیار کوچکی از سیگنال GPS را در حین فرآیند حذف جمینگ تخریب نمایند. مشکل اصلی فیلترهای IIR احتمال ناپایداری آنها در اثر انتخاب ضرایب نامناسب فیلتر است. در واقع هنگام حذف جمینگ در گیرنده GPS، ممکن است شرایطی به وجود آید که در طی فرآیند تنظیم تطبیقی فرکانس، عمق شکاف و پهنای باند فیلتر، ضرایب حاصل موجب ناپایداری فیلتر گردند. در این حالت، خروجی فیلتر به اشباع می رود (به دلیل ظهور مقادیر بی نهایت) و عملیات فیلترینگ متوقف می گردد. به این ترتیب داده مورد نیاز برای بخش های بعدی فراهم نمی شود و خروجی در بخش ناوبری ظاهر نمی گردد.

در این قسمت یک فیلتر IIR مرتبه ۲ برای به کارگیری در بخش پیش از همبسته گیری سامانه جمینگ، انتخاب شده است [۲۱] که قابلیت تنظیم مستقل فرکانس شکاف و عرض شکاف را

بخش ضدجمینگ (در روش‌های صرفاً مبتنی بر پردازش پیش از همبسته‌گیری) می‌شود.

در این مقاله سعی شده است تا طرحی ارائه شود که مانع پیچیده تر شدن بخش فیلترینگ (پیش از همبسته‌گیری) گردد. این طرح ضمن استفاده از ابزارهای ساده، کارایی بالایی را برای مقابله با جمینگ دارد. در واقع نوآوری طرح ارائه شده، تقسیم وظیفه مقابله با جمینگ بین دو بخش در گیرنده است: یکی بلوک مقابله قبل از رهیابی (مانند بسیاری از روش‌های موجود تا کنون) و دیگری بلوک حل معادلات ناوبری. کمک گرفتن از بلوک دوم موجب می‌شود که دیگر نیازی به پیچیده‌تر کردن بلوک اول برای حذف هرچه دقیق‌تر جمینگ قبل از رهیابی نباشد. در واقع کافی است تا بلوک اول صرفاً بتواند حداقل نیازها را برآورده کند. در این صورت، بلوک دوم آثار باقیمانده جمینگ و نیز آثار ناشی از بلوک اول را رفع خواهد نمود.

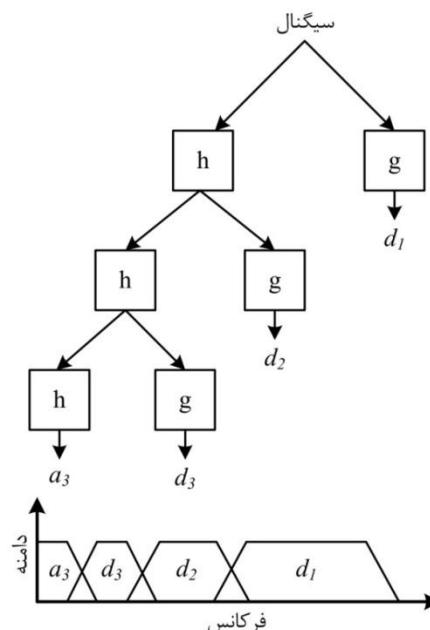
شکل (۲) ساختار سامانه ضدجمینگ پیشنهاد شده در این مقاله را نشان می‌دهد. نحوه عملکرد سامانه پیشنهادی به این صورت است که اگر تعداد ماهواره‌های شناسایی شده در بخش رهیابی<sup>۱</sup> کمتر از ۴ باشد، وضعیت کلید موجود در بلوک نخست به حالت ON تغییر پیدا می‌کند و فیلتر شکاف به حذف جمینگ CW می‌پردازد (همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد بحث این مقاله، شناسایی مشخصه‌های جمینگ نیست و بنابراین بخش شناسایی فرکانس جمینگ که قبل از بلوک فیلتر شکاف قرار دارد، در این جا آورده نشده است). سپس سیگنال بازیابی شده  $\hat{s}(k)$  وارد بخش رهیابی می‌شود و پردازش‌های معمول گیرنده، روی سیگنال بازیابی شده صورت می‌پذیرد.



شکل (۲). سامانه ضدجمینگ پیشنهادی.

قبل از آن که به توضیح عملکرد بلوک دوم سامانه ضدجمینگ پرداخته شود، ضرورت استفاده از چنین بلوکی شرح داده خواهد شد. هنگامی که جمینگ روی می‌دهد، بهره AGC گیرنده به صورت خودکار کاهش می‌یابد تا دامنه سیگنال ورودی ADC در سطح مطلوب حفظ گردد. این امر موجب می‌شود سیگنال GPS کمتر از حالت عادی (عدم حضور جمینگ) تقویت شود و

کمک این فیلترها در شکل (۱) آمده است.



شکل (۱). تجزیه سیگنال به کمک DWT

وقتی سیگنال به کمک تبدیل موجک تجزیه شد، ضرایب به دست آمده، آستانه‌دهی می‌شوند و به این ترتیب زیرباندهای نامطلوب از بین می‌روند. از آنجایی که در حذف نویز داده‌های موقعیت گیرنده GPS، عناصر فرکانس بالا باید حذف شوند تا داده‌های دریافتی هموار گردند، لذا آستانه‌دهی به نحوی صورت می‌گیرد تا بخش فرکانس پایین سیگنال بازیابی شود. نهایتاً سیگنال مطلوب از جمع تمامی ضرایب آستانه‌دهی شده حاصل می‌گردد:

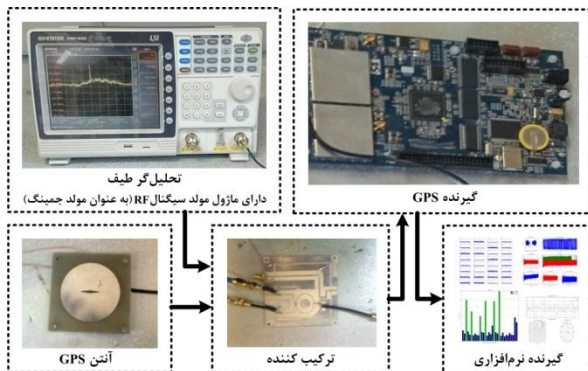
$$f(t) = \sum_k \lambda_{j-1}(k) \varphi(2^{j-1}t-k) + \gamma_{j-1}(k) \psi(2^{j-1}t-k) \quad (11)$$

که در این رابطه،  $f(t)$  سیگنال مطلوب بوده و  $\lambda(k)$  و  $\gamma(k)$  ضرایب آستانه‌دهی شده می‌باشند.

## ۵- روش پیشنهادی

ایده تمامی روش‌های حذف جمینگ مبتنی بر فیلتر شکاف، قرار دادن یک شکاف در فرکانس وقوع جمینگ است [۲۲-۱۸]. تلاش همه این روش‌ها، حذف جمینگ با کمترین تلفات ممکن است، به گونه‌ای که کمترین بخشهای سیگنال اصلی، در فرآیند جمینگ زدایی، آسیب ببینند. در واقع در هر یک از این روش‌ها، سعی شده تا فیلتر شکافی ارائه شود که نسبت به نمونه‌های پیشین، باریکتر (دقیق‌تر) باشد، مشکل پایداری نداشته باشد و باندها و فرکانس‌های مجاور را تحت تاثیر قرار ندهد. این روند که تلاشی برای رسیدن به یک شکاف ایده‌آل است، موجب پیچیده‌تر شدن طراحی فیلتر مذکور و در نتیجه پیچیده شدن

توسط ماژول RF در یک ترکیب کننده، ترکیب می شود. سیگنال ترکیب شده به گیرنده تزریق می شود و خروجی ADC گیرنده (سیگنال IF دیجیتال) به یک گیرنده نرم افزاری وارد می شود تا مراحل رهیابی، ردیابی و حل معادلات ناوبری در این بخش صورت پذیرد. استفاده از گیرنده نرم افزاری، امکان انجام آزمایش های بیشتر در زمان کمتر را می دهد. پارامترهای گیرنده نرم افزاری، دقیقاً مطابق موارد متناظر در گیرنده واقعی تنظیم می شوند.



شکل (۳). بستر آزمایشگاهی جهت جمع آوری داده های واقعی.

برای ارزیابی عملکرد سامانه پیشنهادی، دو نوع جمینگ SCWI و MCWI با نسبت توان جمینگ به سیگنال (JSR) معادل ۳۰-۵۵ dB به داده های واقعی افزوده شده اند. اولین معیار ارزیابی، تعداد ماهواره های بازیابی شده است. برای این که گیرنده بتواند مکان سه بعدی خود را مشخص کند به حداقل چهار ماهواره نیاز دارد. لذا سامانه پیشنهادی، در صورتی عملکرد ضد جمینگ موفق خواهد داشت که تحت شرایط تعریف شده جمینگ، بتواند به گونه ای عمل کند که گیرنده حداقل چهار ماهواره را رهیابی نماید.

معیار دوم، بررسی وجود یک بیشینه قابل تمایز در تابع ابهام  $S(\tau, F_D)$  می باشد. در تابع ابهام،  $\tau$  بیانگر تاخیر بین کد C/A و کپی متناظر تولید شده در گیرنده بوده و  $F_D = f_{if} + f_D$  است.  $f_D$  بیانگر فرکانس داپلر می باشد.

کیفیت سیگنال IF دیجیتال بازیابی شده نیز باید به کمک معیار میانگین مربع خطا (MSE) مورد بررسی قرار گیرد (معیار سوم):

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [\hat{s}(k) - s(k)]^2 \quad (13)$$

معیار چهارم، دقت موقعیت یابی گیرنده می باشد. از آن جایی

در نتیجه نسبت حامل به نویز  $(C/N_0)$  در ورودی حلقه های ردیابی کاهش یابد (اثر اول). از طرف دیگر، به دلیل کاهش کیفیت سیگنال دریافتی، تعداد ماهواره های شناسایی شده در بخش رهیابی کاهش می یابد (اثر دوم). اگر تعداد ماهواره های رهیابی شده کمتر از ۴ گردد، عملکرد گیرنده مختل می شود، ولی اگر تعداد ماهواره های رهیابی شده به کمتر از ۴ ماهواره کاهش پیدا نکند، صرفاً دقت گیرنده تحت تاثیر قرار می گیرد:

$$\Delta P = (G^T G)^{-1} G^T \Delta p \quad (12)$$

که در این رابطه،  $\Delta P$  مقدار خطای موقعیت یابی می باشد که به ماتریس هندسی  $G$  و خطای شبه فاصله  $(\rho \Delta)$  وابسته است. در واقع در هنگام جمینگ خطای شبه فاصله به دلیل اثر اول جمینگ، افزایش می یابد و ماتریس هندسی به دلیل اثر دوم جمینگ، تغییر می کند که هر دو، موجب افزایش خطای تعیین موقعیت می شوند.

از آن جایی که هر بلوک حذف جمینگ پیش از همبسته گیری (در این جا فیلتر شکاف) در حین فرآیند حذف جمینگ، بخش هایی از سیگنال را نیز حذف می کند، کیفیت سیگنال بازیابی شده در حین فرآیند حذف نیز کاهش پیدا می کند (اثر سوم)، که این امر همچنین موجب کاهش مقدار  $C/N_0$  و در نتیجه کاهش دقت گیرنده می گردد.

با توجه به سه مورد ذکر شده در بالا، ضرورت استفاده از بلوک دوم سامانه ضد جمینگ پیشنهادی، به خوبی مشخص می شود. این بلوک با زدودن نویز داده های مکان یابی، سعی در مقابله با آثار جمینگ روی دقت گیرنده دارد. اما از آنجا که گیرنده باید به صورت بلادرنگ عمل کند، لازم است ابزارهایی که برای بلوک های اول و دوم به کار گرفته می شوند، بار محاسباتی زیادی را به سامانه تحمیل نکنند. در این مقاله فیلتر شکاف IIR مرتبه دوم (مطابق توضیحات بخش ۳) برای بلوک اول و تبدیل DWT با تعداد سطوح پردازشی اندک و با استفاده از ساده ترین موجک (مطابق توضیحاتی که در بخش بعدی خواهد آمد)، برای سامانه ضد جمینگ پیشنهادی به کار گرفته شده اند.

## ۶- نتایج شبیه سازی

برای ارزیابی عملکرد سامانه ضد جمینگ پیشنهادی، یک بستر آزمایشگاهی مطابق شکل (۳) فراهم آورده شد. سیگنال GPS توسط آنتن مربوطه دریافت می شود و با جمینگ تولید شده

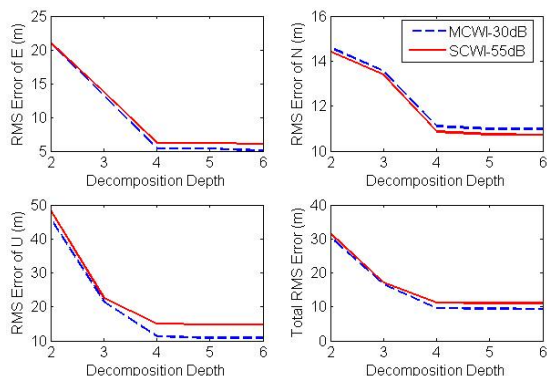
1- Geometry Matrix

2- Pseudo-Range

3- Real-Time

4- Jamming to Signal Power Ratio

5- Mean Square Error



شکل (۴). RMS خطای گیرنده برای سطوح مختلف تجزیه در DWT. همان‌طور که از شکل پیداست، میزان RMS خطای موقعیت‌یابی برای سطوح تجزیه بزرگتر از ۴، تقریباً ثابت است و کاهش چندانی پیدا نمی‌کند. لذا سطح تجزیه  $L=4$  برای بلوک دوم سامانه ضدجمینگ، انتخاب بهینه‌ای می‌باشد و می‌تواند با حجم محاسبات اندک، دقت مناسبی را نتیجه دهد.

به‌منظور انتخاب موجک مادر، مقدار دقت گیرنده در دو حالت جمینگ ذکر شده در بالا، برای موجک‌های مختلف (با عمق تجزیه  $L=4$ )، اندازه‌گیری و در جدول‌های (۱ و ۲) آمده است.

که هدف نهایی گیرنده شناسایی مکان خود با بیشترین دقت ممکن است، لذا این معیار باید به‌دقت بررسی شود. در این مقاله مقدار RMS خطای مکان‌یابی گیرنده در حالت به‌کارگیری سامانه پیشنهادی با حالت به‌کارگیری تنهای فیلتر شکاف [۲۱]، در مختصات E, N و U و نیز در حالت مجموع (T)، مقایسه شده است.

$$RMS_E = \sqrt{\frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} (p_i - m_i)^2} \quad (14)$$

که در این رابطه،  $N_p$  مبین تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده،  $p_i$  مبین موقعیت واقعی گیرنده و  $m_i$  مبین موقعیت تخمین زده شده، گیرنده می‌باشند. لازم به‌ذکر است که موقعیت واقعی، توسط یک گیرنده دقیق دوفرکانسه اندازه‌گیری شده است.

قبل از ارزیابی عملکرد سامانه پیشنهادی، ابتدا باید به طراحی بهینه بلوک دوم سامانه ضدجمینگ پرداخته شود. در گام اول و برای تعیین تعداد سطوح تجزیه موجک (L)، مقدار دقت گیرنده (به کمک رابطه (۱۴)) برای سطوح مختلف تجزیه، در دو حالت جمینگ تک‌تون با JSR=55 dB (توان بیشینه جمینگ) و جمینگ چندتون با JSR=30 dB (توان کمینه جمینگ) اندازه‌گیری و در نمودارهای شکل (۴) آورده شده است.

جدول (۱). RMS خطای گیرنده برای موجک‌های مختلف (در حضور جمینگ تک‌تون با JSR=55 dB).

| Dmey<br>( $l_f=102$ ) | Coif5<br>( $l_f=30$ ) | Bior6.8<br>( $l_f=18$ ) | Rbio6.8<br>( $l_f=18$ ) | Sym8<br>( $l_f=16$ ) | Db10<br>( $l_f=20$ ) | Haar<br>( $l_f=2$ ) | نوع موجک<br>خطای موقعیت (m) |
|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|-----------------------------|
| ۱۳/۶۵                 | ۸/۲۰                  | ۶/۸۴                    | ۶/۸۰                    | ۶/۶۶                 | ۶/۴۸                 | ۵/۳۹                | RMS (E)                     |
| ۱۶/۸۱                 | ۱۱/۸۰                 | ۱۱/۵۴                   | ۱۱/۵۷                   | ۱۱/۶۱                | ۱۱/۸۱                | ۱۱/۱۰               | RMS (N)                     |
| ۱۵/۰۱                 | ۲۰/۲۸                 | ۱۱/۲۴                   | ۱۱/۲۰                   | ۱۰/۹۳                | ۱۸/۲۹                | ۱۱/۲۲               | RMS (U)                     |
| ۱۵/۲۱                 | ۱۴/۳۵                 | ۱۰/۱۱                   | ۱۰/۱۰                   | ۹/۹۸                 | ۱۳/۱۲                | ۹/۶۴                | RMS (T)                     |

جدول (۲). RMS خطای گیرنده برای موجک‌های مختلف (در حضور جمینگ چندتون با JSR=30 dB).

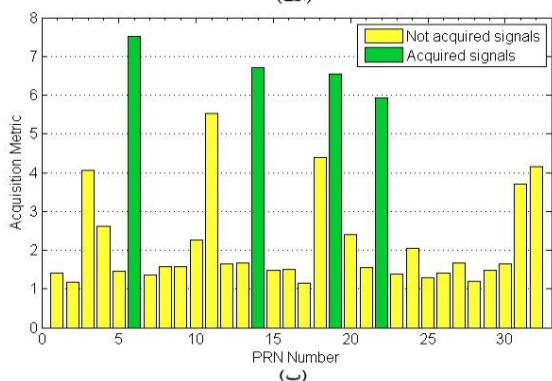
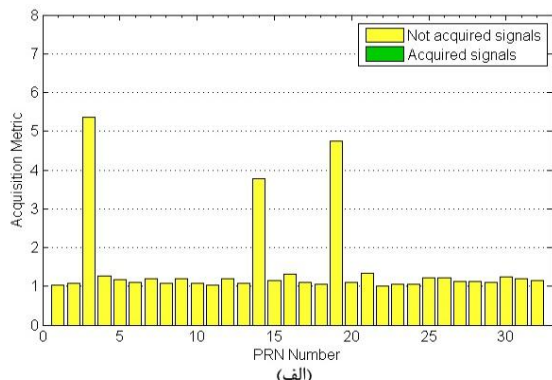
| Dmey<br>( $l_f=102$ ) | Coif5<br>( $l_f=30$ ) | Bior6.8<br>( $l_f=18$ ) | Rbio6.8<br>( $l_f=18$ ) | Sym8<br>( $l_f=16$ ) | Db10<br>( $l_f=20$ ) | Haar<br>( $l_f=2$ ) | نوع موجک<br>خطای موقعیت (m) |
|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|-----------------------------|
| ۷/۹۴                  | ۸/۷۶                  | ۷/۴۴                    | ۷/۴۰                    | ۷/۲۲                 | ۷/۰۲                 | ۶/۱۹                | RMS (E)                     |
| ۱۶/۶۹                 | ۱۱/۶۴                 | ۱۱/۳۴                   | ۱۱/۳۷                   | ۱۱/۴۲                | ۱۱/۵۲                | ۱۰/۸۶               | RMS (N)                     |
| ۱۷/۲۰                 | ۲۰/۹۳                 | ۱۴/۲۸                   | ۱۴/۲۳                   | ۱۴/۱۸                | ۱۸/۸۸                | ۱۴/۹۷               | RMS (U)                     |
| ۱۴/۵۸                 | ۱۴/۷۲                 | ۱۱/۳۷                   | ۱۱/۳۵                   | ۱۱/۳۱                | ۱۳/۳۹                | ۱۱/۲۶               | RMS (T)                     |

محاسباتی) بیشترین دقت مکان‌یابی را در بین موجک‌های مختلف دارد. دلیل این امر را می‌توان ساختار مناسب این فیلتر برای استخراج مولفه‌های فرکانس پایین داده‌های موقعیت، عنوان

در جدول‌های (۱ و ۲)،  $l_f$  مبین طول فیلتر موجک برای حالات مختلف است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، موجک Haar با وجود داشتن کمترین طول فیلتر (کمترین حجم

این سیگنال با کدهای موجود (هر کد مربوط به یک ماهواره) در گیرنده همبسته‌گیری گرفته می‌شود و نتایج با مقدار آستانه تعیین شده در گیرنده مقایسه می‌گردند و نهایتاً ماهواره‌های معتبر شناسایی می‌شوند. شکل (۵) نتیجه رهیابی گیرنده برای  $JSR = 55\text{dB}$  در حالت حضور و عدم حضور سامانه ضدجمینگ را به نمایش گذاشته است. همان‌طور که مشخص است، این جمینگ موجب می‌شود تا گیرنده نتواند هیچ یک از ماهواره‌ها را رهیابی کند. شکل (۵-ب) نشان می‌دهد که استفاده از سامانه ضدجمینگ پیشنهادی، به گیرنده این امکان را داده تا بتواند ۴ ماهواره را رهیابی نماید.

اگر فرآیند همبسته‌گیری بخش رهیابی (برای هر ماهواره) برای کلیه تاخیر کدهای ممکن و کلیه بازه قابل قبول فرکانس داپلر انجام گیرد، اطلاعات جامعی حاصل می‌شود که به تابع ابهام موسوم است. در واقع ورودی این بخش از شبیه‌سازی نیز همان داده IF دیجیتال گیرنده است. شکل (۶) تابع ابهام ماهواره شماره ۱۴ را در حضور جمینگ SCWI با  $JSR = 55\text{dB}$  نشان می‌دهد. از شکل (۶-الف) می‌توان پی برد که وقتی جمینگ روی می‌دهد، تابع ابهام به گونه‌ای تغییر می‌کند که هیچ بیشینه قابل تمایزی را نمی‌توان در آن پیدا نمود. از آنجایی که مطابق شکل (۶-ب) می‌توان یک بیشینه قابل تمایز در تابع ابهام پیدا نمود، نتیجه گرفته می‌شود که الگوریتم ضدجمینگ، موفق عمل کرده است.



شکل (۵). نتیجه رهیابی گیرنده در حضور جمینگ SCWI: الف) قبل از استفاده از سامانه ضدجمینگ و ب) پس از استفاده از سامانه ضدجمینگ.

نمود. لذا موجک مادر Haar برای به‌کارگیری در بلوک دوم سامانه ضدجمینگ، انتخاب شده است.

حال که ساختار بلوک دوم مشخص شد، قبل از ورود به بحث شبیه‌سازی، به بررسی پیچیدگی محاسباتی سامانه پیشنهادی و فیلتر IIR مرتبه ۲ می‌پردازیم. برای پیاده‌سازی یک فیلتر IIR مرتبه دوم مشابه [۱۸، ۲۱ و ۲۲] به ۵ ضرب‌کننده و ۴ جمع‌کننده نیاز است. پس با در نظر گرفتن تعداد  $N_{IF}$  ورودی برای فیلتر (تعداد داده IF دیجیتال در هر دوره پردازش)، بار محاسباتی فیلتر از رابطه (۱۵) به‌دست می‌آید:

$$O(N_{IF}) \approx N_{IF}(5+4) = 9N_{IF} \quad (15)$$

پیچیدگی محاسباتی بلوک دوم سامانه پیشنهادی با تعداد  $N_{nav}$  داده ورودی، به کمک موجک Haar با طول فیلتر  $I_f = 2$  و تعداد سطح پردازش  $L = 4$  برابر خواهد بود با:

$$O(N_{nav}, L, I_f) \approx (L+1)N_{nav}(I_f + 1) = 15N_{nav} \quad (16)$$

با توجه به این که  $N_{nav}$  بسیار کوچکتر از  $N_{IF}$  است ( $N_{nav} \approx 0.001N_{IF}$ )، محاسبات بلوک دوم در مقابل محاسبات بلوک اول قابل نظر است. به این ترتیب تا اینجا، حجم محاسبات روش پیشنهادی و روش استاندارد تقریباً یکسان خواهد بود.

اما مشکل اصلی برای مقایسه پیچیدگی سامانه پیشنهادی و روش‌های استاندارد [۱۸، ۲۱ و ۲۲]، محاسبات مربوط به پارامترهای شکاف در بلوک اول و سامانه‌های استاندارد است؛ چراکه در روش پیشنهادی، پارامترهای فیلتر بلوک اول یکبار تنظیم می‌شوند و همیشه مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حالی که در روش‌های استاندارد مانند [۲۱]، این پارامترها متناسب با شرایط جمینگ مجدداً محاسبه می‌گردند. در واقع این بخش از محاسبات را نمی‌توان به صورت رابطه ریاضی نمایش داد و در مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های استاندارد صرفاً مبتنی بر بلوک اول، به کار برد.

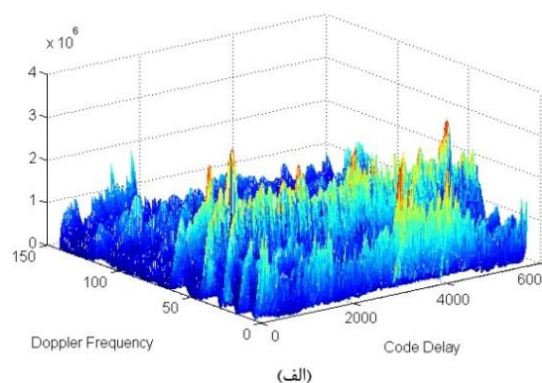
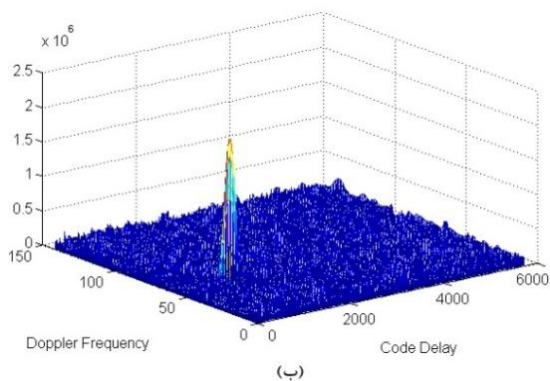
#### ۶-۱- جمینگ موج پیوسته تک‌تون

برای اعمال جمینگ SCWI، یک سیگنال تک‌تون با فرکانس  $1/4 \text{ MHz}$  که نزدیک به فرکانس IF گیرنده است (به دلیل بیشترین اثر تخریبی)، با سیگنال دریافتی، ترکیب شد. در آزمایش‌های مختلف، دامنه جمینگ افزوده شده، به گونه‌ای تنظیم گردید که بازه JSR بین  $55\text{dB}$  -  $30\text{dB}$  را پوشش دهد. در حالت عادی و بدون اعمال جمینگ، در زمان انجام آزمایش، گیرنده قادر به رهیابی ۷ ماهواره بود که با افزودن جمینگ با JSR بیشتر یا مساوی  $35\text{dB}$  تعداد ماهواره‌های رهیابی شده به کمتر از ۴ ماهواره تنزل پیدا می‌کرد. لذا تنها برای جمینگ با  $JSR = 30\text{dB}$  بلوک اول سامانه ضدجمینگ پیشنهادی در حالت خاموش قرار گرفت.

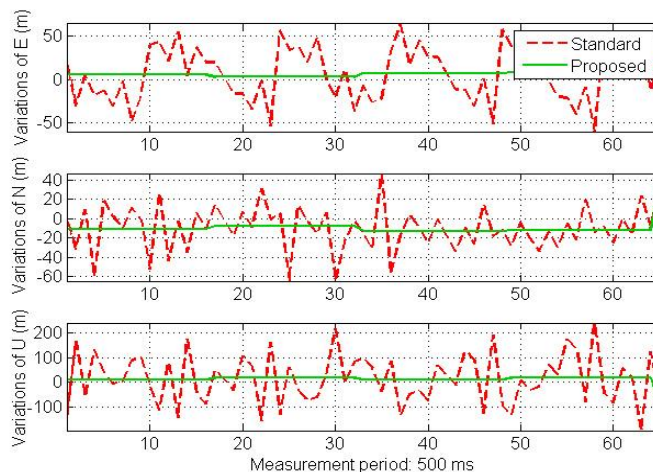
ورودی بخش رهیابی سیگنال IF دیجیتال گیرنده می‌باشد. از

یک بلوک ساده پس از همبسته‌گیری و بدون تحمیل بار محاسباتی زیاد به گیرنده، توانسته است دقت مکان‌یابی را به مقدار محسوسی افزایش دهد. میزان بهبود ناشی از به‌کارگیری سامانه پیشنهادی در مقایسه با روش استاندارد، برای JSRهای مختلف، در جدول (۳) آمده است. نتایج جدول (۳) حاکی از افزایش دقت گیرنده به میزان ۸۳ درصد (به طور متوسط) در ازای به‌کارگیری روش پیشنهادی، در مقایسه با روش استاندارد است.

داده ناوبری که در بخش ردیابی استخراج می‌شود به‌عنوان ورودی، به بخش حل معادلات ناوبری تزریق شده و سپس رمزگشایی می‌گردد. در این بخش، اطلاعاتی از قبیل موقعیت ماهواره‌ها، مقادیر شبه فاصله و پارامترهای دیگر (بسته به نوع گیرنده) استخراج می‌شوند و پس از حل معادلات ناوبری به کمک ساده‌ترین الگوریتم‌ها، موقعیت گیرنده به‌دست می‌آید. شکل (۷) نمودارهای تعیین موقعیت گیرنده برای مختصات E، N و U را برای روش استاندارد [۲۱] و نیز روش پیشنهادی، به نمایش گذاشته است. مشاهده می‌شود که روش پیشنهادی با استفاده



شکل (۶). تابع ابهام ماهواره شماره ۱۴ در حضور جمینگ SCWI: الف) قبل از استفاده از سامانه ضدجمینگ و ب) پس از استفاده از سامانه ضدجمینگ.



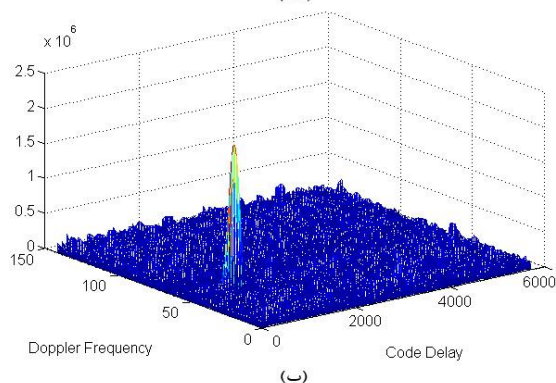
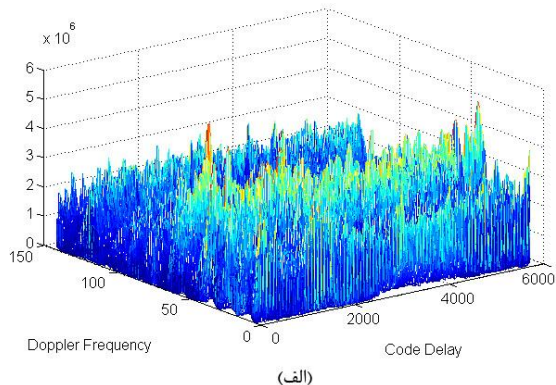
شکل (۷). مقایسه دقت مکان‌یابی گیرنده برای مختصات E، N و U برای روش‌های استاندارد و پیشنهادی (JSR=55 dB).

جدول (۳). RMS خطای گیرنده برای روش استاندارد و روش پیشنهادی در حضور جمینگ تک‌تون.

| درصد پیشرفت | RMS خطای موقعیت در روش پیشنهادی (m) |       |       |      | RMS خطای موقعیت در روش استاندارد (m) |        |       |       | تعداد ماهواره بازیابی شده | JSR (dB) |
|-------------|-------------------------------------|-------|-------|------|--------------------------------------|--------|-------|-------|---------------------------|----------|
|             | T                                   | U     | N     | E    | T                                    | U      | N     | E     |                           |          |
| ۸۲/۴۶       | ۱۰/۹۳                               | ۹/۰۲  | ۱۵/۶۲ | ۵/۷۹ | ۶۲/۳۱                                | ۱۰۰/۱۶ | ۲۵/۰۶ | ۳۱/۴۲ | ۵                         | ۳۰       |
| ۸۴/۵۵       | ۹/۶۳                                | ۱۱/۲۲ | ۱۱/۱۰ | ۵/۳۹ | ۶۲/۳۱                                | ۱۰۰/۱۶ | ۲۵/۰۶ | ۳۱/۴۲ | ۵                         | ۳۵       |
| ۸۴/۵۵       | ۹/۶۳                                | ۱۱/۲۲ | ۱۱/۱۰ | ۵/۳۹ | ۶۲/۳۱                                | ۱۰۰/۱۶ | ۲۵/۰۶ | ۳۱/۴۲ | ۵                         | ۴۰       |
| ۸۲/۳۶       | ۱۱/۲۶                               | ۱۴/۹۷ | ۱۰/۸۶ | ۶/۱۹ | ۶۳/۸۵                                | ۱۰۲/۹۹ | ۲۴/۹۵ | ۳۱/۶۶ | ۴                         | ۴۵       |
| ۸۲/۳۶       | ۱۱/۲۶                               | ۱۴/۹۷ | ۱۰/۸۶ | ۶/۱۹ | ۶۳/۸۵                                | ۱۰۲/۹۹ | ۲۴/۹۵ | ۳۱/۶۶ | ۴                         | ۵۰       |
| ۸۲/۳۶       | ۱۱/۲۶                               | ۱۴/۹۷ | ۱۰/۸۶ | ۶/۱۹ | ۶۳/۸۵                                | ۱۰۲/۹۹ | ۲۴/۹۵ | ۳۱/۶۶ | ۴                         | ۵۵       |



بیشینه قابل تمایز در تابع ابهام پیدا نمود، نتیجه گرفته می شود که الگوریتم ضدجمینگ، موفق عمل کرده است.



شکل (۹). تابع ابهام ماهواره شماره ۱۴ در حضور جمینگ MCWI: الف) قبل از استفاده از سامانه ضدجمینگ و ب) پس از استفاده از سامانه ضدجمینگ.

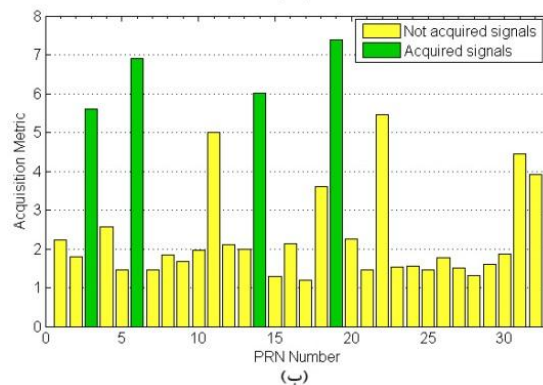
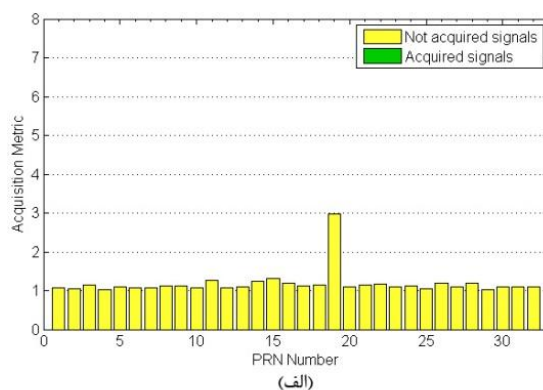
شکل (۱۰) نمودارهای تعیین موقعیت گیرنده برای مختصات  $E, N$  و  $U$  را برای روش استاندارد و نیز روش پیشنهادی، در حالت جمینگ با  $JSR = 30\text{ dB}$  به نمایش گذاشته است. مشاهده می شود که روش پیشنهادی با به کارگیری یک بلوک ساده پس از همبسته گیری و بدون تحمیل بار محاسباتی زیاد به گیرنده، توانسته است دقت مکان یابی را حتی با وجود خاموش بودن بلوک پیش از همبسته گیری، به مقدار محسوسی افزایش دهد. میزان بهبود ناشی از به کارگیری سامانه پیشنهادی در مقایسه با روش استاندارد، برای  $JSR$ های مختلف، در جدول (۴) آمده است. جدول (۴) حاکی از افزایش دقت گیرنده به میزان ۸۲ درصد (به طور متوسط) در ازای به کارگیری روش پیشنهادی، در مقایسه با روش استاندارد است.

در نهایت کیفیت سیگنال IF بازبازی شده توسط سامانه ضدجمینگ پیشنهادی، برای هر دو نوع جمینگ اعمالی در  $JSR$ های مختلف، به کمک معیار  $MSE$  اندازه گیری و مقایسه شده است. شکل (۱۱) نشان می دهد که میزان  $MSE$  برای سیگنال بازبازی شده در حضور جمینگ چندتون بیشتر از جمینگ تک تون است. دلیل این امر، تخریب بیشتر سیگنال GPS در اثر به کارگیری تعداد بیشتر فیلتر شکاف، در حالت مقابله با جمینگ چندتون است.

### ۲-۶- جمینگ موج پیوسته چندتون

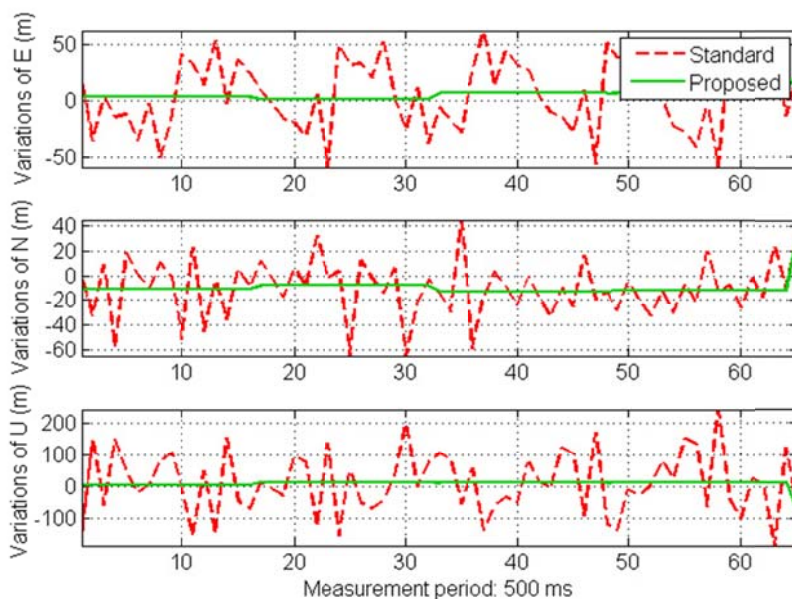
برای اعمال جمینگ MCWI، سه سیگنال تک تون در بازه فرکانسی ۰/۹-۱/۹ MHz با سیگنال دریافتی ترکیب شد. در آزمایش های مختلف، دامنه جمینگ افزوده شده، به گونه ای تنظیم گردید که بازه JSR بین ۳۰-۵۵ dB را پوشش دهد. با افزودن جمینگ با JSR بیشتر یا مساوی ۳۵ dB تعداد ماهواره های رهایی شده به کمتر از ۴ ماهواره تنزل پیدا می کرد. لذا مانند جمینگ تک تون، تنها برای جمینگ با  $JSR = 30\text{ dB}$ ، بلوک اول سامانه ضدجمینگ پیشنهادی در حالت خاموش قرار گرفت.

شکل ۸ نتیجه رهایی گیرنده را برای  $JSR = 55\text{ dB}$  در حالت حضور و عدم حضور سامانه ضدجمینگ، به نمایش گذاشته است. همان طور که مشخص است، این جمینگ موجب می شود تا گیرنده نتواند هیچ یک از ماهواره های قابل رویت را رهایی کند. استفاده از سامانه ضدجمینگ پیشنهادی به گیرنده این امکان را داده تا بتواند ۴ ماهواره را رهایی نماید.



شکل (۸). نتیجه رهایی گیرنده در حضور جمینگ MCWI: الف) قبل از استفاده از سامانه ضدجمینگ و ب) پس از استفاده از سامانه ضدجمینگ.

شکل (۹) تابع ابهام ماهواره شماره ۱۴ را در حضور جمینگ MCWI با  $JSR = 55\text{ dB}$  نشان می دهد. از شکل (۹-الف) می توان پی برد که وقتی جمینگ روی می دهد، تابع ابهام به گونه ای تغییر می کند که هیچ بیشینه قابل تمایزی را نمی توان در آن پیدا نمود. از آنجایی که مطابق شکل (۹-ب) می توان یک

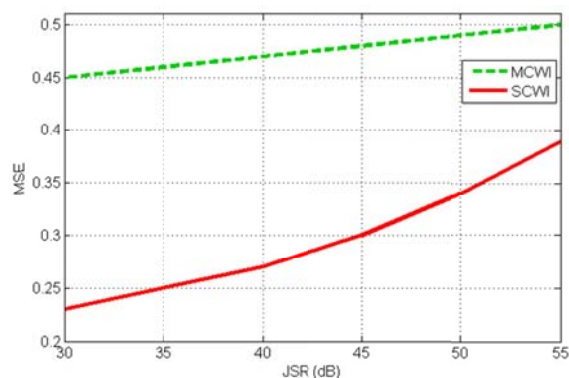


شکل (۱۰). مقایسه دقت مکان‌یابی گیرنده برای مختصات E, N و U برای روش‌های استاندارد و پیشنهادی (JSR=30 dB).

جدول (۴). RMS خطای گیرنده برای روش استاندارد و روش پیشنهادی در حضور جمینگ چندتون.

| درصد پیشرفت | RMS خطای موقعیت در روش پیشنهادی (m) |       |       |       | RMS خطای موقعیت در روش استاندارد (m) |        |       |       | تعداد ماهواره بازبازی شده | JSR (dB) |
|-------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|--------------------------------------|--------|-------|-------|---------------------------|----------|
|             | T                                   | U     | N     | E     | T                                    | U      | N     | E     |                           |          |
| ۷۶/۴۶       | ۱۴/۶۷                               | ۴/۰۴  | ۲۴    | ۷/۳۱  | ۶۲/۳۱                                | ۱۰۰/۱۶ | ۲۵/۰۶ | ۳۱/۴۲ | ۶                         | ۳۰       |
| ۸۴/۵۵       | ۹/۶۳                                | ۱۱/۲۲ | ۱۱/۱۰ | ۵/۳۹  | ۶۲/۳۱                                | ۱۰۰/۱۶ | ۲۵/۰۶ | ۳۱/۴۲ | ۵                         | ۳۵       |
| ۸۴/۵۵       | ۹/۶۳                                | ۱۱/۲۲ | ۱۱/۱۰ | ۵/۳۹  | ۶۲/۳۱                                | ۱۰۰/۱۶ | ۲۵/۰۶ | ۳۱/۴۲ | ۵                         | ۴۰       |
| ۸۴/۵۵       | ۹/۶۳                                | ۱۱/۲۲ | ۱۱/۱۰ | ۵/۳۹  | ۶۲/۳۱                                | ۱۰۰/۱۶ | ۲۵/۰۶ | ۳۱/۴۲ | ۵                         | ۴۵       |
| ۸۲/۱۴       | ۱۲/۷۴                               | ۱۱/۰۹ | ۱۶/۱۳ | ۱۰/۲۱ | ۷۱/۳۴                                | ۱۱۲/۲۴ | ۳۴/۹۴ | ۳۸/۰۶ | ۴                         | ۵۰       |
| ۸۲/۱۴       | ۱۲/۷۴                               | ۱۱/۰۹ | ۱۶/۱۳ | ۱۰/۲۱ | ۷۱/۳۴                                | ۱۱۲/۲۴ | ۳۴/۹۴ | ۳۸/۰۶ | ۴                         | ۵۵       |

ضدجمینگ به‌گونه انتخاب شد که حجم محاسباتی اندکی به سامانه تحمیل شود و گیرنده بتواند به‌صورت بلادرنگ به حذف جمینگ بپردازد. بلوک پیش از همبسته‌گیری به کمک فیلتر شکاف IIR مرتبه دو، جمینگ CW را از سیگنال IF دیجیتال حذف می‌نماید و بلوک پس از همبسته‌گیری، با استفاده از فیلتر موجک Haar (با عمق پردازش اندک) به حذف آثار جمینگ روی داده‌های موقعیت گیرنده می‌پردازد. همچنین ساختار سامانه ضدجمینگ به‌گونه‌ای تنظیم شده است که تنها در صورتی که تعداد ماهواره‌های رهیابی شده کمتر از ۴ گردد، بلوک پیش از همبستگی فعال شود. این تدبیر موجب کاهش حجم محاسبات و افزایش سرعت مقابله با جمینگ، در موارد ذکر شده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی روی داده‌های واقعی نشان داد که به‌کارگیری روش پیشنهادی، به‌طور متوسط موجب افزایش دقت مکان‌یابی گیرنده به میزان ۸۲/۵ درصد نسبت به روش استاندارد می‌شود.



شکل (۱۱). مقدار MSE سیگنال بازبازی شده برای JSRهای مختلف.

### ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک سامانه ضدجمینگ ترکیبی برای مقابله با جمینگ CW پیشنهاد شد. در سامانه ارائه‌شده، وظیفه حذف جمینگ بین دو بلوک پیش از همبسته‌گیری و پس از همبسته‌گیری تقسیم می‌گردد. ساختار بلوک‌های سامانه

## ۸- مراجع

- [12] T. H. Stitz and M. Renfors, "Filter Bank based Narrowband Interference Detection and Suppression in Spread Spectrum Systems," EURASIP J. Appl. Sig. P., vol. 2004, pp. 1163-1176, 2004.
- [13] M. R. Mosavi, M. Pashaian, M. J. Rezaei, and K. Mohammadi, "Jamming Mitigation in Global Positioning System Receivers using Wavelet Packet Coefficients Thresholding," IET Signal Process, vol. 9, no. 5, pp. 457-464, 2015.
- [14] A. V. Picois and N. Samama, "Near-Far Interference Mitigation for Pseudolites Using Double Transmission," IEEE T Aero. Elec. Sys., vol. 50, no. 4, pp. 2929-2941, 2014.
- [15] A. Bourse, E. Cetin, and A. G. Dempster, "Enhanced GPS Interference Detection and Localisation," Electron Lett., vol. 50, no. 19, pp. 1391-1393, 2014.
- [16] W. L. Mao, "Novel SREKF-Based Recurrent Neural Predictor for Narrowband/FM Interference Rejection in GPS," AEU-Int J. Electron C, vol. 62, no. 3, pp. 216-222, 2008.
- [17] C. H. Kang, S. Y. Kim, and C. G. Park, "Global Navigation Satellite System Interference Tracking and Mitigation based on an Adaptive Fading Kalman Filter," IET Radar Sonar Nav., vol. 9, no. 8, pp. 1030-1039, 2015.
- [18] M. R. Mosavi and F. Shafiee, "Narrowband Interference Suppression for GPS Navigation using Neural Networks," GPS Solut, 2015. (DOI: 10.1007/s10291-015-0442-8).
- [19] M. G. Amin and C. Wang, "Optimum Interference Excision in Spread Spectrum Communications using Open-Loop adaptive Filters," IEEE T Signal Proces, vol. 47, no. 7, pp. 1966-1976, 1999.
- [20] D. Borio, L. Camoriano, and L. L. Presti, "Two-Pole and Multi-Pole Notch Filters: A Computationally Effective Solution for GNSS Interference Detection and Mitigation," IEEE Systems Journal, vol. 2, no. 1, pp.38-47, 2008.
- [21] Y. R. Chien, "Design of GPS Anti-Jamming Systems using Adaptive Notch Filters," IEEE Systems Journal, no. 99, pp. 1-10, 2013.
- [22] N. Varshney and R. C. Jain, "An Adaptive Notch Filter for Narrow Band Interference Removal," National Conf. on Communications, New Delhi, India, pp.1-5, 2013.
- [1] E. P. Glennon and A. G. Dempster, "Delayed PIC for Post Correlation Mitigation of Continuous Wave and Multiple Access Interference in GPS Receivers," IEEE T Aero. Elec. Sys., vol. 47, no. 4, pp. 2544-2557, 2011.
- [2] D. Borio, "GNSS Acquisition in the Presence of Continuous Wave Interference," IEEE T Aero. Elec. Sys., vol. 46, no. 1, pp. 47-60, 2010.
- [3] F. A. Khan, C. Rizos, and A. G. Dempster, "Locata Performance Evaluation in the Presence of Wide and Narrow-Band Interference," J. Navigation, vol. 63, no. 3, pp. 527-543, 2010.
- [4] M. Li, A. G. Dempster, A. T. Balaei, C. Rizos, and F. Wang, "Switchable Beam Steering/Null Steering Algorithm for CW Interference Mitigation in GPS C/A Code Receivers," IEEE T Aero. Elec. Sys., vol. 47, no. 3, pp. 1564-1579, 2011.
- [5] Q. Li, D. Xu, W. Wang, X. Wang, and Z. Han, "Anti-Jamming Scheme for GPS Receiver with Vector Tracking Loop and Blind Beamformer," Electron Lett., vol. 50, no. 19, pp. 1386-1388, 2014.
- [6] Y. D. Zhang and M. G. Amin, "Anti-Jamming GPS Receiver with Reduced Phase Distortions," IEEE Signal Proc. Let., vol. 19, no. 10, pp. 635-638, 2012.
- [7] T. Higgins, T. Webster, and A. K. Shackelford, "Mitigating Interference via Spatial and Spectral Nulling," IET Radar Sonar Nav., vol. 8, no. 2, pp. 84-93, 2014.
- [8] F. Bastide, D. Akos, C. Macabiau, and B. Roturier, "Automatic Gain Control (AGC) as an Interference Assessment Tool," In Proc. 16th Int. Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS/GNSS '03), pp. 2042-2053, USA, 2003.
- [9] L. Musumeci and F. Dovis, "Use of the Wavelet Transform for Interference Detection and Mitigation in Global Navigation Satellite Systems," International Journal of Navigation and Observation, vol. 2014, Article ID 262186, 14 pages, 2014. doi:10.1155/2014/262186
- [10] D. Borio, L. Camoriano, S. Savasta, and L. Lo Presti, "Time-Frequency Excision for GNSS Applications," IEEE Systems Journal, vol. 2, no. 1, pp. 27-37, 2008.
- [11] M. J. Rezaei, M. Abedi, and M. R. Mosavi, "New GPS Anti-Jamming System based on Multiple Short-Time Fourier Transform," IET Radar Sonar Nav., vol. 10, no. 4, pp. 807-815, 2016.

---

## A New Method for Cancelling CW Jamming in GPS Receivers

M. J. Rezaei, M. R. Mosavi\*

\*Iran University of Science and Technology

(Received: 15/11/2015, Accepted: 03/05/2016)

### ABSTRACT

*Jamming cancellation is an important issue for global positioning system (GPS) receivers. As continuous wave (CW) jamming is the most widely used type of the jamming, this paper proposes a new anti-jamming system for mitigation CW jamming in GPS receivers. The proposed method employs infinite impulse response notch filters and wavelet transform for jamming mitigation. The proposed system can be implemented in the digital signal processor of the receiver. The computational complexity of the proposed method is low and it leads to an accurate positioning. Simulation results show that the proposed method has an average progress of 82.5% in term of positioning accuracy compared with standard method.*

**Keywords:** Wavelet Transform, Jamming, Notch Filter, GPS Receiver.

---

\* Corresponding Author Email: M\_Mosavi@iust.ac.ir